

# Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma topossequência em Piracicaba (SP)<sup>1</sup>

## VIS-NIR-SWIR spectroscopy in soil evaluation along a toposequence in Piracicaba

José A. M. Demattê<sup>2\*</sup>, Suzana Romero Araújo<sup>3</sup>, Peterson Ricardo Fiorio<sup>4</sup>, Caio Troula Fongaro<sup>2</sup> e Marcos Rafael Nanni<sup>5</sup>

**RESUMO** - Objetivou-se neste trabalho caracterizar diferentes solos por espectrorradiometria de reflectância ao longo de uma topossequência na região de Piracicaba, SP. Amostras de solo foram coletadas e analisadas em campo, em laboratório de análises químicas e por sensores Vis-NIR (400-2500 nm). Alterações nos solos da topossequência foram identificáveis nas informações espectrais. Constituintes dos solos, tais como, matéria orgânica, mineralogia, formas de óxidos de ferro e granulometria foram determinantes nas variações das feições de absorção e intensidades de reflectância. Cada perfil mostrou características espectrais diferenciadoras entre horizontes, relacionadas à intensidade, feições de absorção e morfologia da curva. A avaliação morfológica não pode ser avaliada pelo sensor, sendo uma de suas limitações. Existe relação entre grau de intemperismo (índices ki, relação silte/argila e mineralogia) e dados espectrais. Isso foi observado nos solos originados de basalto, onde houve aumento do ferro extraído pelo ditionito (cristalino e amorfo) na sequência Nitossolo Vermelho Latossólico (NVL) em direção ao Cambissolo (C) e, aumento do ferro amorfo nesta mesma sequência. Na avaliação da topossequência completa observou-se a sequência de absorção centrada em 500 e 850 nm decrescente do Nitossolo Vermelho Latossólico em direção ao Chernossolo, ou seja, na sequência de decréscimo dos teores de ferro cristalino (hematita e goethita) e aumento de ferro amorfo, corroborado pelo aumento dos valores do índice ki. Houve relação entre os dados espectrais, o índice ki e a posição do solo na paisagem. Esses resultados mostram que a espectrorradiometria é uma ferramenta promissora para auxiliar o levantamento de solos. Entretanto, há necessidade do suporte à implantação de bibliotecas de dados espectrais de solos com acesso irrestrito aos usuários.

**Palavras-chave:** Solos-espectroscopia. Sensoriamento remoto. Mapeamento de solos.

**ABSTRACT** - The aim of this work was to characterise by reflectance spectroradiometry different soils along a toposequence in Piracicaba, in the state of São Paulo, Brazil. Soil samples were collected and analysed in the field, in a laboratory for chemical analysis and by Vis-NIR sensors (400-2500 nm). Changes in the soils of the toposequence could be identified in the spectral information. Such soil constituents as organic matter, mineralogy, types of iron oxide and particle size determined variations in absorption features and reflectance intensities. Each profile displayed distinctive spectral characteristics between horizons, related to intensity, absorption features and curve morphology. The sensor could not be used to carry out the morphological evaluation, this being one of its limitations. There is a relationship between the degree of weathering (KI indices, silt to clay ratio and mineralogy) and the spectral data. This was seen in the basalt-based soils, where there was an increase in the iron extracted by dithionite (crystalline and amorphous) for the sequence, Latosolic Red Nitosol (NVL) to Cambisol (C), and an increase in amorphous iron for the same sequence. Evaluation of the complete toposequence showed that the absorption sequence centred on 500 and 850 nm decreased from the Latosolic Red Nitosol towards the Cambisol, i.e. following the decrease in crystalline iron content (hematite and goethite) and the increase in amorphous iron. This was substantiated by increases in KI index values. There was a relationship between the spectral data, KI index and landscape position of the soil. These results show that spectroradiometry is a promising tool to assist in soil surveys. However there is a need to support the implementation of libraries of soil spectral data, with unrestricted user access.

**Key words:** Soil spectroscopy. Remote sensing. Soil mapping.

DOI: 10.5935/1806-6690.20150054

\* Autor para correspondência

<sup>1</sup>Recebido para publicação em 26/09/2014; aprovado em 13/07/2015

Parte da Tese de Livre Docência do primeiro autor apresentada na Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo

<sup>2</sup>Departamento de Ciência do Solo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba-SP, Brasil, 13.418-900, jamdemat@usp.br

<sup>3</sup>Universidade Federal Rural da Amazônia, Instituto Socioambiental e de Recursos Hídricos, Av Presidente Tancredo Neves, 2501, Montese, Belém-PA, Brasil, suzanaromeiro@yahoo.com.br

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia de Biossistemas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba-SP, Brail, fiorio@usp.br

<sup>5</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, Maringá-PR, Brasil, 87.020-900, mrnanni@uem.br

## INTRODUÇÃO

A ciência do solo e particularmente os estudos sobre a gênese dos solos, avançaram consideravelmente quando os conceitos das formas de relevo foram aplicados para explicar as diferenças nos solos e as relações entre eles. Desde meados da década de 30, Milne (1935) em seu trabalho original que conceitua o termo *catena* notou que os perfis de solos mudavam de características em função de sua posição no relevo. Posteriormente, o termo *catena* foi alterado permitindo considerar mais de um material de origem, e passou-se a adotar o termo mais abrangente de *topossequência*.

As topossequências são componentes básicos no mapeamento de solos. No Estado de São Paulo e, particularmente no município de Piracicaba, estas são bem definidas, com destaque para as relacionadas com as coberturas de arenitos sobre rochas eruptivas básicas e as relacionadas com arenitos sobre folhelhos (DEMATTÊ; MARCONI, 1991).

Nas últimas décadas, as avaliações de solos por meio de técnicas de sensoriamento remoto (SR) ganharam destaque (ARAÚJO; DEMATTÊ; BELLINASSO, 2013; DEMATTÊ *et al.*, 2004; DEWITTE *et al.*, 2012). A maioria dos trabalhos envolve o uso das regiões do visível e infravermelho próximo do espectro eletromagnético (400-2500 nm). Além da aplicação em levantamentos de solos (BELLINASSO; DEMATTÊ; ROMEIRO, 2010), surgem outras na quantificação da mineralógica (VISCARRA ROSSEL; MCGLYNN; MCBRATNEY, 2006), na avaliação da qualidade do solo (VAGEN; SHEPHERD; WALSH, 2006) e na agricultura de precisão (STENBERG *et al.*, 2010).

As curvas espectrais de solos (assinaturas espectrais) são formadas a partir da irradiância de energia que interage com o solo e reflete em diferentes comprimentos de onda, sendo esta informação captada por sensores. O comportamento espectral dos solos é afetado por diversos fatores, destacando-se: a cor, a classe de solos, composição mineralógica, teor de umidade e granulometria (EPIPHANIO *et al.*, 1992).

Baseado no conceito de reflectância de solos e com a utilização de métodos estatísticos, muitos autores obtiveram resultados significativos na predição do teor de matéria orgânica (VISCARRA ROSSEL *et al.*, 2008), argila (BROWN *et al.*, 2006), valores de CTC, areia e silte com  $R^2 > 0,80$  (BUDDENBAUM; STEFFENS, 2012), pH (LEE *et al.*, 2007) Ca (ARAÚJO; DEMATTÊ; BELLINASSO, 2013), CTC (NANNI; DEMATTÊ, 2006), dentre outros.

A maioria dos trabalhos de radiometria contemplando solos tropicais teve sua caracterização

de maneira pontual, sem relacionar as alterações ao longo da paisagem. Por outro lado, trabalhos como o de Demattê e Marconi (1991) avaliaram alterações de solos ao longo de uma topossequência sob a perspectiva dos métodos analíticos tradicionais e de laboratório. Poderia então ser feita a avaliação usando equipamentos sensores na mesma área?

Considerando que existem correlações entre as particularidades das curvas espectrais com as características químicas, físicas e mineralógicas dos solos, há a possibilidade de se utilizar o SR como ferramenta para sua discriminação, e, assim, auxiliar em futuros levantamentos de solos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar descritivamente as alterações dos dados espectrais dos solos ao longo de uma topossequência, formada a partir de quatro materiais de origem na região de Piracicaba, SP, quais sejam: materiais da Formação Rio Claro, Irati, Estrada Nova e Serra Geral. Os solos são predominantemente de textura argilosa com exceção do originado da Formação Rio Claro, com argilas de baixa a alta atividade, o que pode conferir alterações na energia refletida captada pelo sensor. Além disso, espera-se que as formas das curvas sejam diferentes na medida em que se altera a posição do solo na topossequência.

## MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada situa-se na região de Piracicaba, SP (22°42' S e 40°37' W). O clima é do tipo Cwa (Köppen), com temperatura média anual de 21,6 °C e precipitação pluviométrica anual de 1.415 mm. Os solos encontrados na área, como detalhado por Vidal Torrado *et al.* (1999) são: Latossolo Vermelho-Amarelo textura média (LVA), Nitossolo Vermelho latossólico (NVL), Nitossolo Vermelho (NV), Cambissolos (C), Chernossolo (MX), Vertissolos (V), Plintossolo Vértico (FX) e Gleissolos (G).

Foram alocados na topossequência 29 pontos de amostragem, nas profundidades de 0-20, 20-40 e 80-100 cm. Os pontos foram georreferenciados e demarcados a distâncias regulares, sendo selecionados a cada 100 m na parte mais plana e elevada do relevo, a cada 50 m na encosta e a cada 30 m no ombro da encosta. Nas posições mais representativas foram alocados quatro perfis que foram também descritos morfologicamente (SANTOS *et al.*, 2005).

Nas amostras de solo foram realizadas análises químicas (GALVÃO *et al.*, 2008), granulométrica e o ataque sulfúrico - aqui designado de ferro total ou ferro do ataque sulfúrico, além da determinação das formas de ferro amorfo e cristalino (VISCARRA ROSSEL *et al.*,

2010), análises por difração de raios-X e a análise termo diferencial (JACKSON, 1969). Nas amostras dos perfis LVA, NVL e V foram aplicados os seguintes tratamentos (JACKSON, 1969): i. testemunha; ii. remoção da matéria orgânica (MO); iii. remoção da MO e do ferro amorfo; iv. remoção da MO, do ferro amorfo e cristalino.

Os dados espectrais foram obtidos com o espectrorradiômetro IRIS (Infrared Intelligent Spectroradiometer - Mark V) (GENÚ; DEMATTÊ; NANNI, 2013). Antes das medições espectrorradiométricas, as amostras foram preparadas (HENDERSON; BAUMGARDNER; FRANSMEIER, 1992) e acondicionadas em placas de Petri. O sensor foi posicionado verticalmente a uma distância de 27 cm acima da amostra, iluminada com uma lâmpada halógena de 650 W, com refletor parabólico e feixe não colimado para o plano visado, posicionada a 61 cm da amostra e com um ângulo zenital de 15°. Como padrão de referência para determinar o fator de reflectância, utilizou-se uma placa de 100% de reflectância. A avaliação descritiva das curvas espectrais foi realizada avaliando-se as feições de absorção, a intensidade de reflectância e a forma geral da curva ao longo do espectro eletromagnético (DEMATTÊ, 2002).

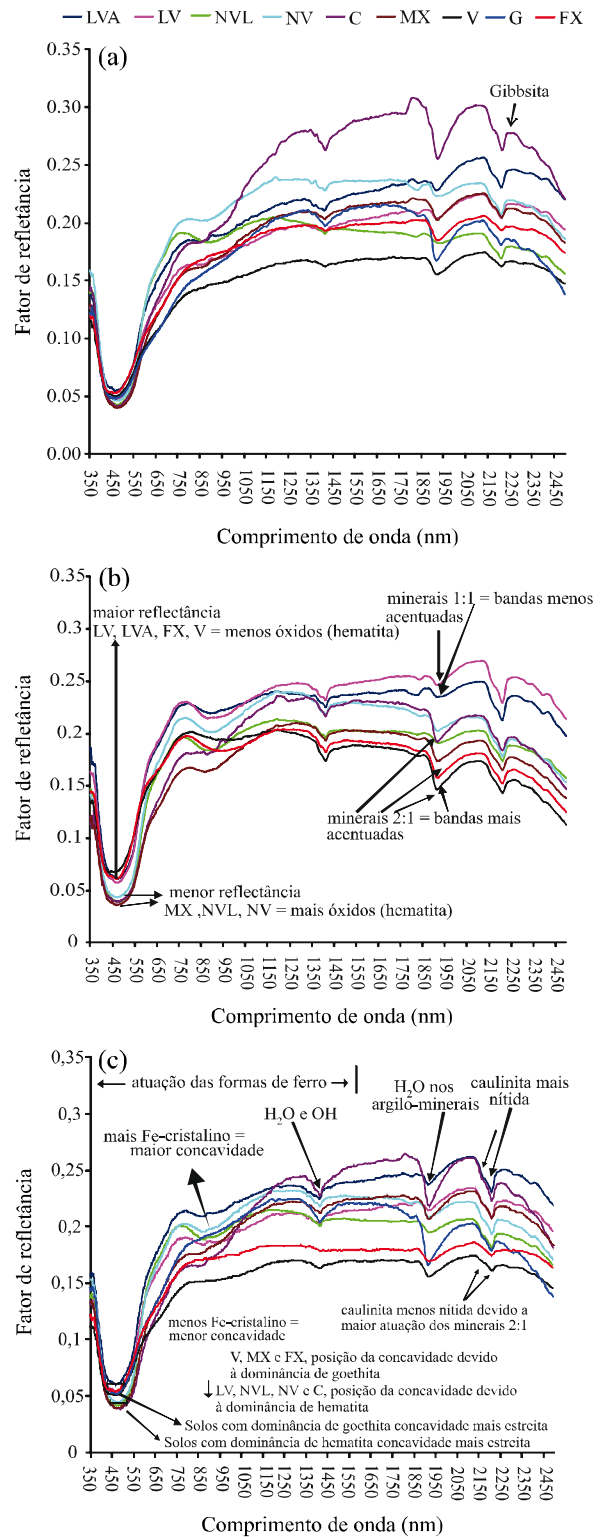
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Relação entre dados espectrais e atributos dos solos

As curvas espectrais médias das camadas de 80-100 cm dos solos estudados apresentaram feições espectrais melhor evidenciadas do que das camadas superficiais (Figura 1), o que é especialmente observado no Vertissolo (V) (Figura 1b). Isso se deve ao maior teor de MO nas camadas de 0-20 cm do solo, que atua em todo o espectro e, pode mascarar algumas de suas feições (DEMATTÊ; EPHIPHANIO; FORMAGGIO, 2003). Os solos com maiores proporções de minerais opacos, tais como os NVL, NV, C e MX, apresentaram intensidades de reflectância mais baixas do que aqueles pobres nestes minerais, como o LV e LVA, visíveis na camada 60-80 cm (Figura 1b), pela não interferência da MO. Devido à opacidade de minerais como a magnetita e ilmenita, abundantes em solos derivados de rochas eruptivas básicas, há alteração em todo o espectro óptico, reduzindo sua reflectância (HUNT; SALISBURY; LENHOFF, 1971). Estas absorções responsáveis pela opacidade são atribuídas à transferência de carga entre os íons de ferro e oxigênio (SELLITTO *et al.*, 2009).

Com a remoção da MO dos solos, foi observado aumento da intensidade de reflectância espectral dos

**Figura 1** - Curvas espectrais médias na profundidade 0-20 cm (a), 80-100 cm (b) e 20-40 cm (c), (LVA) Latossolo Vermelho Amarelo textura média; (LV) Latossolo Vermelho; (NVL) Nitossolo Vermelho Latossólico; (NV) Nitossolo Vermelho; (C) Cambissolo; (MX) Chernossolo; (V) Vertissolo; (FX) Plintossolo Vértico



mesmos (Figura 2), ratificando o efeito de absorção de energia pela MO (GMUR *et al.*, 2012).

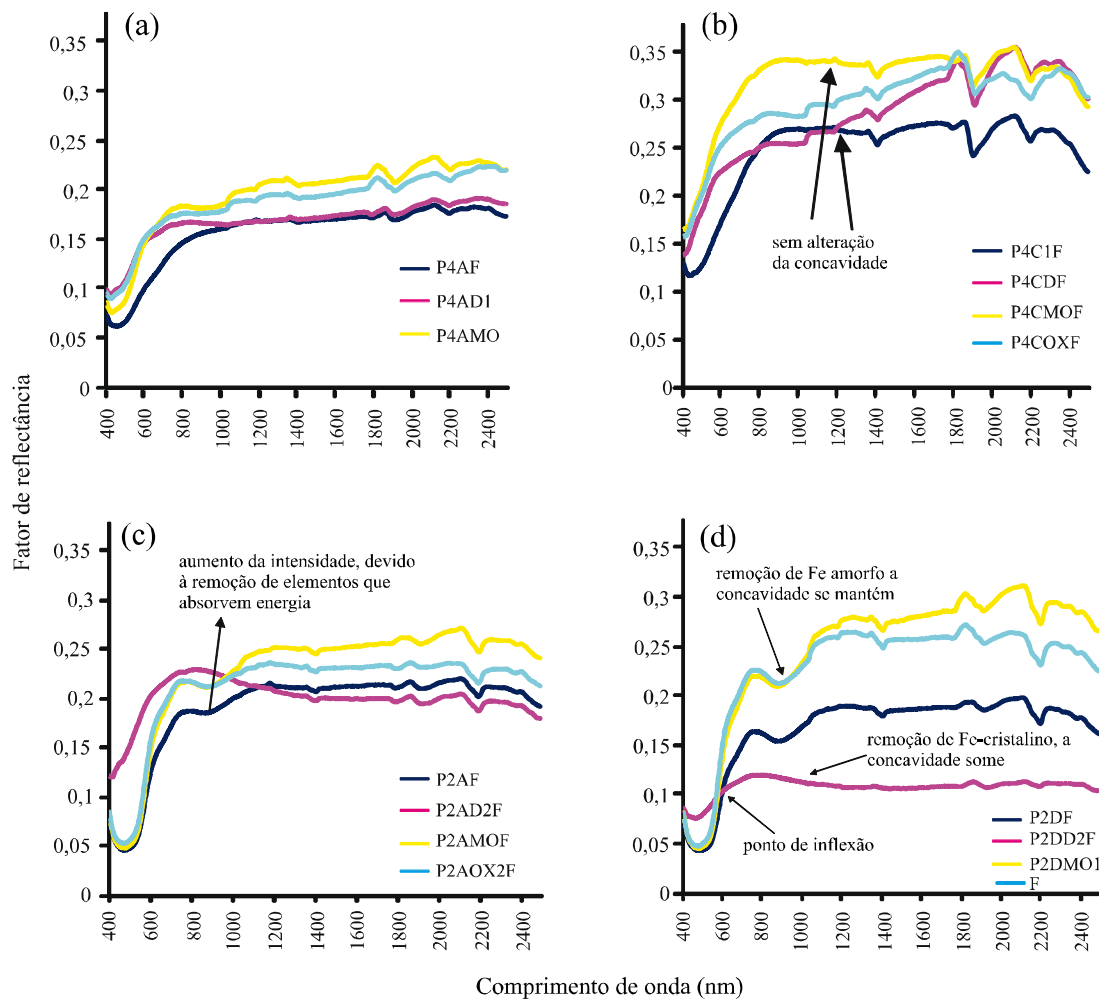
Em relação à mineralogia da fração argila, solos cauliniticos, como LV e LVA, apresentaram bandas de absorção menos acentuadas em 1.400 e 1.900 nm (Figura 1b) quando comparados ao V, onde há presença de mais de um tipo de mineral 2:1. Resultados semelhantes foram observados por Demattê *et al.* (2006) em Chernossolos do Paraná. De acordo com Hunt, Salisbury and Lenhoff (1971) as feições características em 1.400 e 2.200 nm devem-se às vibrações das moléculas de OH de suas estruturas.

Embora as bandas localizadas próximas a 2.200 nm apresentem feições de absorção tanto para minerais 1:1 quanto para os 2:1 (Figura 1c), suas formas são diferentes.

Observa-se a presença de um “degrau” no formato da banda de absorção relacionada ao mineral 1:1, enquanto o mineral 2:1 também promove a absorção nesta banda, porém sem o “degrau” (Figura 1c). Solos com predominância de minerais 2:1, como o Vertissolo não apresentam feição nítida da caulinita em 2.200 nm, justamente pelo fato do mineral 2:1 estar atuando conjuntamente e de maneira mais forte nesta banda (DEMATTÊ *et al.*, 2006).

Os solos classificados como MX, NVL e NV são mais ricos em hematita, e apresentaram intensidades de reflectância menores do que aquelas verificadas em amostras de LV e LVA (Figura 1). Os óxidos de ferro apresentam características distintas ao longo da curva espectral, com feições centradas em 530 nm para a hematita e, 480 nm para goethita (SHERMAN; WAITE, 1985). Além disso, a concavidade em 480 nm é

**Figura 2** - Curvas de reflectância dos perfis do Vertissolo (P4) e Nitossolo (P2), nas profundidades de 0-20 (a) e 80-100 (b) cm, com os seguintes tratamentos: D: remoção de matéria orgânica + ferro amorfo + ferro cristalino; MO: remoção de matéria orgânica; Ox: remoção de matéria orgânica + ferro amorfo



mais estreita para solos predominantemente goetíticos, quando comparados aos hematíticos (Figura 1c). Os solos LVA e LV, desenvolvidos de sedimentos da Formação Rio Claro, apresentaram as curvas espectrais de mais elevada reflectância com concavidade estreita entre 360-600 nm e reflectância de 6,5% em 480 nm. O espectro a partir de 800 nm apresentou concavidade mais acentuada no grupo 2 (LV) do que no grupo 1 (LVA) (Figura 1a). Isto se deve ao maior teor de ferro no LV (100 g kg<sup>-1</sup>) (Tabelas 1 e 2). A feição espectral observada em 1.900 nm é pouco intensa nos dois solos (Figura 1b). Isso pode ser explicado pela predominância da caulinita, comprovada pela análise mineralógica da fração argila nestes solos (Tabelas 1 e 2). Geralmente solos com textura mais arenosa (neste caso, LVA e LV), tendem a apresentar uma reflectância mais elevada entre 1.300-2.100 nm (DEMATTÊ, 2002). As feições espectrais de pequena absorção na faixa dos 2.265 nm podem ser atribuídas à gibbsita presente nestes solos (MADEIRA NETTO, 1996) e verificada nas curvas dos solos Latossolos (Figura 1c). A gibbsita atua na forma de expressão de feição, não tendo influência na intensidade da reflectância espectral (BEN-DOR, 2011).

Já as curvas espectrais médias dos solos desenvolvidos de diabásio apresentaram a mais baixa reflectância na faixa dos 500 nm, com concavidade larga e acentuada na faixa entre 360 e 600 nm (Figura 1c). A partir de 800 nm as curvas apresentam concavidade mais acentuada nos grupos 3 e 4 e, menor nos grupos 5 e 6. Essa característica é atribuída ao ferro extraído pelo ataque sulfúrico. Entretanto, os teores de ferro total (ferro do ataque sulfúrico) destes solos não diferiram muito entre si, com valores médios de 213; 246; 223 e 236 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 2). Uma explicação para as diferenças nas reflectâncias destes solos nesta faixa espectral pode ser a natureza dos óxidos de ferro (DEMATTÊ; GARCIA, 1999). Assim, não se pode atribuir as concavidades nestas faixas como função do teor de ferro total, mas sim da forma de ferro existente como os óxidos hematita (maior ocorrência nos LV, NV e NVL) e goethita (maior ocorrência nos LVA). Especificamente para os solos originados de basalto, NVL, a remoção da MO aumentou a reflectância a partir dos 800 nm até os 2.400 nm (Figura 2). Com a remoção do ferro amorfo, a reflectância tende a aumentar em toda a extensão da curva, porém, há manutenção das feições correspondentes ao ferro. Com a remoção do ferro amorfo e cristalino, a reflectância aumenta entre 400 e 600 nm e as feições típicas são removidas, como a concavidade na faixa de 700 a 1.000 nm (Figura 2). Tal fato vem indicar que é o ferro cristalino, hematita e/ou goethita e não o amorfo, o responsável pelas feições nas curvas espectrais nestes comprimentos de onda.

Os resultados mostram redução do ferro extraído pelo ditionito (cristalino e amorfo) na sequência NVL em direção ao MX com 188 e 160 g kg<sup>-1</sup> na terceira camada, e aumento do ferro extraído pelo oxalato (ferro amorfo) nesta mesma sequência, de 9,9 g kg<sup>-1</sup> para 16,4 g kg<sup>-1</sup> de solo (Tabelas 1 e 2). Sendo assim, a sequência de absorção centrada em 500 nm e 850 nm é decrescente de NVL em direção ao MX, ou seja, sequência de decréscimo do ferro cristalino e aumento do ferro amorfo (Figura 1).

Pode-se notar que as feições em 1.400 nm aumentaram de intensidade na direção do NVL (0,87) ao MX (1,03), o mesmo ocorrendo nas bandas em 1.900 (2,21 e 3,80 para NVL e MX, respectivamente) e 2.200 nm. A expressão da absorção em 1.900 nm é fraca no NVL e NV, porém pouco mais acentuada do que nos solos dos grupos 1 e 2. Além disso, de acordo com a literatura, a ocorrência de minerais 2:1 tende a aumentar a absorção em 1.400 e 1.900 nm (CLARK *et al.*, 1990). Neste caso, o aumento de minerais 2:1 ocorre na direção NVL para MX (Tabelas 1 e 2), representado pela vermiculita cloritizada (verificada na análise por difratometria de raio X) e pequena contribuição da esmectita. A mais baixa reflectância das curvas do MX, dentre os solos desenvolvidos de basalto, se deve ao maior teor de MO (16,3 g kg<sup>-1</sup> no NVL e 22 g kg<sup>-1</sup> no MX) e também ao maior teor de minerais neste solo, que tendem a reduzir sua reflectância. Segundo Demattê e Marconi (1991), os solos da área estudada apresentam minerais não magnéticos e magnéticos, sendo os valores destes últimos de 15,3; 19,4; 31 e 29,6% na sequência NVL em direção ao V.

As curvas espectrais dos solos desenvolvidos de rochas das Formações Estrada Nova (folhelhos), Irati (siltitos e argilitos) e Serra Geral (vulcânicas, basalto) diferem das demais nos seguintes aspectos: i. maior reflectância centrada a 500 nm na faixa de 6%; ii. menor concavidade na faixa 800 a 1.000 nm, principalmente para o Vertissolo; iii. semelhança nas feições a 1.400; 1.900 e 2.200 nm com os solos de mineralogia 2:1, porém com maior absorção em 1.900 nm para o grupo 8. A menor concavidade na faixa 800 a 100 nm observada no Vertissolo deve-se ao maior teor de esmectita neste solo. Além disso, ocorre ligeiro deslocamento para a direita da concavidade na faixa 800-1.000 nm (Figura 1c), devido à influência dos óxidos de ferro. Sabe-se que a goethita tende a promover este deslocamento (MADEIRA NETO; BATISTA, 2000) A difração de raios-X destes solos indicou (picos) típicos de goethita e lepidocrocita. A maior absorção em 1.900 nm para o grupo 8 se deve ao maior teor de esmectita neste solo (Tabelas 1 e 2).

**Tabela 1** - Resultados médios das análises química e mineralógica das amostras de terra das tradagens

Prof. cm	pH			MO <sup>(1)</sup> g kg <sup>-1</sup>	P mg dm <sup>-3</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H <sup>+</sup>	SB	CTC
	H <sub>2</sub> O	KCl	CaCl <sub>2</sub>								
Grupo 1 - LVA											
0-20	5,8	4,6	4,8	16,3	3,3	1,33	0,53	0,1	2,53	1,91	4,44
20-40	5,8	4,6	5,3	13,7	2,0	1,33	0,5	0,07	1,87	1,85	3,72
60-80	6,0	4,8	5,1	9,7	4,0	1,67	0,97	0,13	1,3	2,66	3,96
Grupo 2 - LV											
0-20	5,9	5,0	5,0	20,3	2,5	2,25	0,5	0,0	2,63	2,78	5,41
20-40	6,0	5,0	5,1	13,3	3,0	1,75	0,45	0,0	2,23	2,22	4,45
60-80	6,2	5,1	5,2	10,3	2,0	1,75	0,35	0,0	1,73	2,12	3,84
Grupo 3 - NVL											
0-20	6,0	5,1	5,1	24,7	25,8	4,43	2,53	0,07	3,20	7,33	10,53
20-40	5,9	5,1	5,1	19,7	11,7	2,98	1,02	0,23	3,15	4,22	7,37
60-80	6,0	5,4	5,4	16,3	23,0	3,3	0,88	0,0	2,02	4,39	6,41
Grupo 4 - NV											
0-20	6,1	5,6	5,3	41,0	30,3	5,4	1,8	0,0	2,47	8,15	10,62
20-40	6,3	5,6	5,3	31,3	21,7	5,47	1,33	0,0	2,73	7,73	10,46
60-80	6,5	5,7	5,7	23,0	18,0	5,20	0,83	0,0	2,07	6,28	9,34
Grupo 5 - C											
0-20	6,1	5,05	5,4	48,5	62,0	8,45	2,15	0,0	4,70	11,33	16,03
20-40	6,3	5,14	5,3	36,0	42,0	8,10	1,95	0,0	4,30	10,32	14,62
60-80	6,0	4,7	5,3	31,0	29,0	9,00	2,3	0,0	4,4	11,43	15,83
Grupo 6 - MX											
0-20	6,2	5,1	5,3	45,3	37,3	4,57	1,53	0,0	4,60	8,43	13,03
20-40	6,4	5,1	5,4	35,7	24,0	5,46	1,47	0,0	3,07	9,70	12,77
60-80	6,5	5,3	5,7	22,0	13,7	5,10	1,43	0,0	4,07	9,26	13,33
Grupo 7 - V											
0-20	5,9	4,9	5,0	40,7	44,0	6,20	2,17	0,07	4,87	9,02	13,89
20-40	6,0	4,9	5,1	27,3	23,3	6,53	1,97	0,03	3,87	8,76	12,63
60-80	5,8	4,3	4,7	14,7	19,3	8,23	3,23	2,63	8,87	11,55	20,12
Grupo 8 - FX											
0-20	5,8	4,9	5,0	51,3	63,5	7,63	2,83	0,05	5,35	10,95	16,30
20-40	6,2	5,1	5,3	25,0	13,5	7,25	2,05	0,0	3,40	10,09	12,84
60-80	6,3	5,1	5,4	15,3	5,5	6,50	2,53	0,10	3,10	10,10	12,21

<sup>(1)</sup>Matéria Orgânica

**Tabela 2** - Resultados médios das análises químicas e mineralógica das amostras de terra das tradagens

Prof. cm	Amorfo						
	Caulinita	Gibbsita	(2:1) <sup>(1)</sup>	Fe-livre	Si+Al	V	m
-----g kg <sup>-1</sup> de solo-----							-----%-----
Grupo 1 - LVA							
0-20	95,3	20,7	14,0	22,7	14,0	42,0	5,7
20-40	106,3	31,3	18,7	25,7	14,7	50,0	4,0
60-80	162,3	44,7	19,7	46,7	20,0	64,3	3,0
Grupo 2 - LV							
0-20	92,0	16,8	12,3	54,5	5,8	51,3	0,0
20-40	126,0	22,8	21,3	69,0	6,0	49,5	0,0
60-80	158,0	38,5	29,8	89,5	9,3	54,3	0,0
Grupo 3 - NVL							
0-20	262,3	38,3	59,3	135,7	33,5	61,5	2,0
20-40	277,7	64,3	61,7	146,7	40,7	55,7	7,3
60-80	299,3	61,5	62,3	152,0	41,0	68,0	0,0
Grupo 4 - NV							
0-20	244,0	22,0	63,7	181,7	5,3	75,0	0,0
20-40	227,7	17,7	53,3	188,7	9,3	73,0	0,0
60-80	290,0	25,7	66,0	200,7	4,0	74,7	0,0
Grupo 5 - C							
0-20	176,0	7,5	62,5	168,5	5,0	70,5	0,0
20-40	201,5	20,5	74,5	192,0	8,0	70,0	0,0
60-80	233,0	16,0	79,0	178,0	24,0	62,0	0,0
Grupo 6 - MX							
0-20	172,3	0,0	98,3	157,7	6,3	64,7	0,0
20-40	204,0	0,0	118,0	168,3	3,0	75,7	0,0
60-80	259,3	0,0	124,7	160,7	25,3	73,3	0,0
Grupo 7 - V							
0-20	85,0	0,0	150,7	108,0	6,0	62,7	1,3
20-40	89,0	0,0	150,3	115,7	8,3	67,0	0,7
60-80	132,0	0,0	288,3	127,3	29,0	58,0	17,7
Grupo 8 - FX							
0-20	87,3	0,0	176,0	111,3	13,3	67,3	0,5
20-40	87,5	0,0	194,8	117,3	10,5	73,3	0,0
60-80	140,3	0,0	305,0	150,5	39,3	74,5	1,3

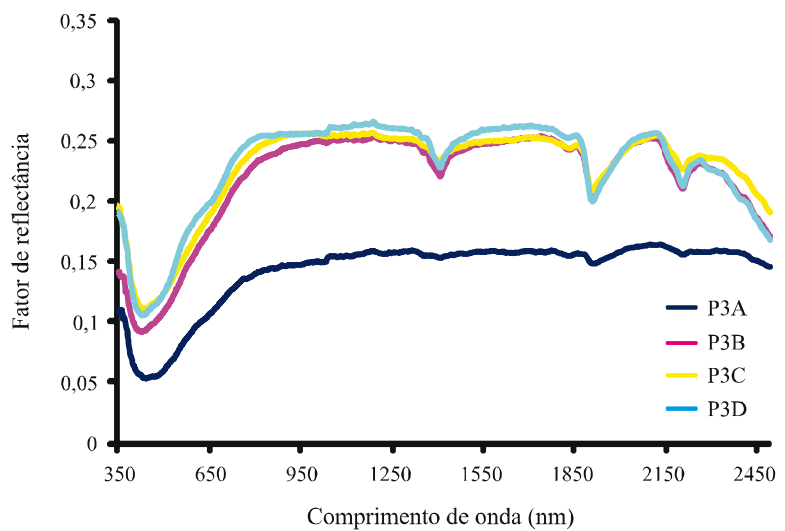
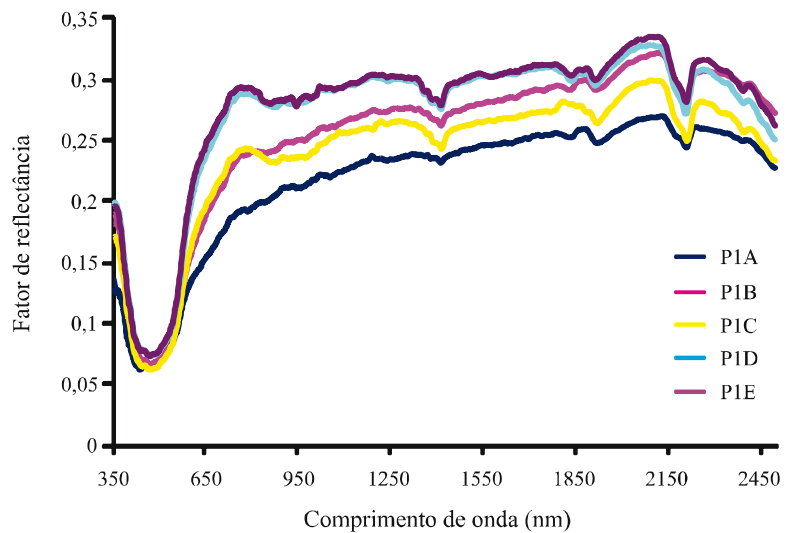
<sup>(1)</sup> Inclui todos os minerais 2:1, entre eles, Esmectita, Vermiculita, Vermiculita cloritizada, montmorilonita, micas e ilita; m - saturação por alumínio

**Relação da reflectância com índices de intemperismo e classificação de solos**

Solos mais intemperizados, como o LV (Typic Hapludox) e o NVL, ocupam a posição de topo, enquanto o MX e o C ocupam posições de encosta e sopé, respectivamente, na toposequência. Estes, por sua vez, foram bem discriminados através de curvas espectrais (Figura 1), principalmente nas faixas de 400 a 600 nm e nas bandas atribuídas a efeitos da mineralogia do solo em 1.900 e 2.200 nm (referente à ocorrência de minerais de argila 2:1 como a

montmorilonita). As feições de absorção centradas principalmente em 1.900 nm aumentaram de intensidade do NVL ao MX. Observando os principais perfis dessa toposequência (Figura 3), de fato, as formas e feições são diferentes. Portanto, observa-se que, do solo mais intemperizado para o menos intemperizado (avaliando-se exclusivamente os solos desenvolvidos de mesmo material, como o basalto), ocorrem alterações na intensidade de reflectância e feições de absorção. Esse resultado reitera o observado por Demattê e Garcia (1999), que apontam a relação entre o processo de formação dos solos, sua

**Figura 3** - Curvas espectrais dos horizontes (A, B, C, D, E) de perfis estudados e difratogramas de raios-X da fração argila desferificada de suas amostras: (a) Latossolo Vermelho Amarelo (Typic Hapludox, textura média) e (b) Vertissolo (Palludert) (Valores *d* em nanômetros)





mineralogia e as curvas espectrais. De fato, no geral os solos com maior grau de intemperismo apresentam intensidade de reflectância mais baixas e feições de absorção menos pronunciadas, como os LV, NV e NVL, ao contrário dos MX. A Figura 3 ilustra os perfis dos solos, juntamente com sua classificação, observando-se diferenças já discutidas sobre padrões espectrais. Ou seja, cada solo classificado individualmente, deve possuir características espectrais próprias.

## CONCLUSÕES

1. Diferenças nos dados espectrais de solos são observadas em função de alterações em suas propriedades ao longo da topossequência, tais como a mineralogia da fração argila e a textura. Os solos desenvolvidos da Formação Rio Claro (arenitos) apresentaram maior reflectância espectral quando comparados com os solos desenvolvidos das Formações Estrada Nova (folhelho) e Irati (siltito e argilito);
2. O grau de intemperismo (avaliado pelo índice  $k_i$ , relação silte/argila e mineralogia da argila) apresentou relação com a posição dos solos na paisagem e com os dados espectrais. Nos solos com o mesmo material de origem, como os originados de basalto, observou-se aumento dos valores de ferro extraído pelo ditonito (cristalino e amorfo) e pelo oxalato (ferro amorfo) na sequência Nitossolo Vermelho Latossólico em direção ao Cambissolo. Na avaliação da topossequência como um todo (considerando os diferentes materiais de origem) observou-se uma sequência de absorção, centrada em 500 e 850 nm, decrescente do Nitossolo Vermelho Latossólico em direção ao Chernossolo. Esta é a sequência de decréscimo dos valores de ferro cristalino (hematita e goethita) e aumento do valor do ferro amorfo, também ratificado pelo aumento do índice  $k_i$ ;
3. Os dados espectrais apresentaram correlação descritiva das curvas entre horizontes de um mesmo perfil, e quando a comparação é feita entre perfis. Tal avaliação permite inferir sobre a importância da informação descritiva preliminar na classificação de solos. Entretanto, são necessárias bibliotecas espectrais padrões para efeito de comparação. Independente da importância e alta correlação destas curvas, destaca-se que a informação espectral está relacionada com aspectos químicos, granulométricos e mineralógicos do solo, sendo porém limitada para interpretar as características morfológicas, que devem ser descritas em nível de campo.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, S. R.; DEMATTÊ, J. A. M.; BELLINASSO, H. Analysing the effects of applying agricultural lime to soils by VNIR spectral sensing: a quantitative and quick method. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 13, p. 4570-4584, 2013.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil classification (in Portuguese). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 861-870, 2010.
- BEN-DOR, E. Characterization of soil properties using reflectance spectroscopy. In: Thenkabail, P. S.; Lyon, J. G. and Huete, A. (Ed.) **Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation**. Boca Raton: CRC press. p. 513-557, 2011.
- BROWN, D. J. *et al.* Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 132, n. 3/4, p. 273-290, 2006.
- BUDDENBAUM, H.; STEFFENS, M. Mapping the distribution of chemical properties in soil profiles using laboratory imaging spectroscopy, SVM and PLS regression. **EARSeL eProceedings**, v. 11, n. 1, p. 25-32, 2012.
- CLARK, R. N. *et al.* High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. **Journal of Geophysics Research**, v. 95, n. B8, p. 12653-12680, 1990.
- DEMATTÊ, J.A.M. *et al.* Determining soil water status and other soil characteristics by spectral proximal sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v.135, p. 179-195, 2006.
- DEMATTÊ, J. A. M.; GARCIA, G. J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n. 2, p. 327-342, 1999.
- DEMATTÊ, J. A. M.; EPHIPHANIO, J. C. N.; FORMAGGIO, A. C. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia**, v. 62, n. 3, p. 451-464, 2003.
- DEMATTÊ, J. A. M. *et al.* Visible-NIR reflectance: a new approach on soil evaluation. **Geoderma**, v. 121, n. 1/2, p. 95-112, 2004.
- DEMATTÊ, J. L. I.; MARCONI, A. A drenagem na mineralogia de solos desenvolvidos de diabásio em Piracicaba (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 15, n. 1, p. 1-8, 1991.
- DEMATTÊ, J. A. M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 10 p. 1445-1458, 2002.
- DEWITTE, O. *et al.* Satellite remote sensing for soil mapping in Africa: An overview. **Progress in Physical Geography**, v. 36, p. 514-38, 2012.
- EPIPHANIO, J. C. N. *et al.* **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1992. p. 131.

- GALVÃO, L. S. *et al.* Relationships between the mineralogical and chemical composition of tropical soils and topography from hyperspectral remote sensing data. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 63, n. 2, p. 259-271, 2008.
- GMUR, S. *et al.* Hyperspectral Analysis of Soil Nitrogen, Carbon, Carbonate, and Organic Matter Using Regression Trees. **Sensors**, v. 12, n. 8, p.10639-10658, 2012.
- GENÚ A. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; NANNI, M. R. Characterization and comparison of soil spectral response obtained from orbital (ASTER e TM) and terrestrial (IRIS). **Ambiência**, v. 9, n. 2, p. 279-88, 2013.
- HENDERSON, T. L.; BAUMGARDNER, M. F.; FRANSMEIER, D. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 865-72, 1992.
- HUNT, G. R.; SALISBURY, J. W.; LENHOFF, C. J. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides. **Modern Geology**, v. 2, p. 195-205, 1971.
- JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advanced course**. Madison: Wisconsin University, 1969. 895 p.
- LEE, K. S. *et al.* Wavelength Identification for Reflectance Estimation of surface and subsurface soil properties. **ASAE**, v. 52, n. 3, p. 683-695, 2007.
- MADEIRA NETTO, J. S. Spectral reflectance properties of soils. **Photo Interpretation**, v. 34, p. 59-70, 1996.
- MADEIRA NETTO, J. S.; BAPTISTA, G. M. **Reflectância espectral de solos**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000. 55p.
- MILNE, G. Some suggested units of classification and mapping, particularly for East African Soils. **Soil Research**, v. 4, p. 183-198, 1935.
- NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral reflectance Methodology in Comparison to Traditional Soil Analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 393-407, 2006.
- SANTOS, R. D. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.
- SHERMAN, D.M.; WAITE, T.D. Electronic spectra of Fe<sup>3+</sup> oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. **American Mineralogist**. v.70, p.1262-1269, 1985.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. **SAS/STAT: user's guide: version 6.4.ed.** v. 2. Cary: SAS, 846p. 2003.
- STENBERG, B. O. *et al.* Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Advances in Agronomy**, v. 107, n. 2, 2010, p.163-215, 2010.
- SELLITTO, V. M. *et al.* Comparing two different spectroscopic techniques for the characterization of soil iron oxides: diffuse versus bi-directional reflectance. **Geoderma**, v. 149, n. 1/2, p. 2-9, 2009.
- VAGEN, T. G.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Sensing landscape level change in soil fertility following deforestation and conversion in the highlands of Madagascar using Vis-NIR spectroscopy. **Geoderma**, v. 133, n. 3/4, p. 281-294, 2006.
- VIDAL-TORRADO, P. *et al.* Pedogênese em uma seqüência Latossolo-Podzólico na borda de um platô na depressão periférica paulista. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 23, n. 4, p. 909-921, 1999.
- VISCARRAROSSEL, R.A.; MCGLYNN, R.N.; MCBRATNEY, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, v. 137, n. 1/2, p.70-82, 2006.
- VISCARRA-ROSSEL, R. A. *et al.* Using a legacy soil sample to develop a mid-IR spectral library. **Australian Journal of Soil Research**, v. 46, n. 1, p. 1-16, 2008.
- VISCARRA ROSSEL, R. A. *et al.* Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible-near-infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. F4, p. 1-18, 2010.