

SEÇÃO V - GÊNESE, MORFOLOGIA E CLASSIFICAÇÃO DO SOLO

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DOS SOLOS NA PAISAGEM A PARTIR DE DADOS COLETADOS POR SENSORES TERRESTRE E ORBITAL⁽¹⁾

José Geraldo de Abreu Sousa Junior⁽²⁾, José Alexandre Melo
Demattê⁽³⁾ & Aline Marques Genú⁽⁴⁾

RESUMO

Parte da variabilidade dos índices de produção agrícola está associada com as características do solo e da paisagem. Dessa forma, práticas de manejo, como a adubação, devem levar em consideração esta variabilidade. O sensoriamento remoto é uma ferramenta que pode fornecer, de maneira rápida, informações para o manejo do solo, pois relaciona a radiação eletromagnética com os atributos do solo. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento espectral, em dois níveis de aquisição de dados (terrestre e orbital), de diferentes classes de solos ao longo de toposseqüências na região de São Carlos e Ibaté, SP. Para isso, amostras de terra georreferenciadas foram coletadas em 319 pontos, em três profundidades. Em seguida, obtiveram-se os dados radiométricos em laboratório, na faixa espectral entre 450 e 2.500 nm. Os mesmos locais amostrados na camada superficial, no campo, foram avaliados na imagem de satélite. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que: (a) teores de areia grossa, argila e matéria orgânica, e cor tiveram relação com a reflectância dos solos; (b) ao longo das vertentes ocorrem variações nos dados espectrais dos solos; e (c) solos da mesma ordem taxonômica, porém com classes texturais diferentes, apresentam diferentes comportamentos espectrais, podendo ser discriminados por sensoriamento remoto.

Termos de indexação: toposseqüência, atributos do solo, reflectância.

⁽¹⁾ Trabalho da Tese de Mestrado do primeiro autor apresentada a Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ, para obtenção do título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas. Recebido para publicação em abril de 2006 e aprovado em dezembro de 2007.

⁽²⁾ Mestre em Solos e Nutrição de Plantas, Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, Caixa Postal 09, CEP 13.418-900 Piracicaba (SP). E-mail: josegeraldojunior@hotmail.com

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: jamdemat@esalq.usp.br

⁽⁴⁾ Professor Adjunto, Departamento de Agronomia, UNICENTRO. Rua Simeão Camargo Varela de Sá, 03, CEP 85040-080 Guarapuava (PR). E-mail: agenu@eunicentro.br

SUMMARY: SPECTRAL RESPONSE OF SOILS IN THE LANDSCAPE BASED ON TERRESTRIAL AND ORBITAL DATA ACQUISITION LEVELS

Part of agricultural production index variability is associated with soil and landscape characteristics. Management practices such as fertilizer application should therefore take the soil spatial variability into account. Remote sensing is a tool that can provide faster information for soil management because it relates electromagnetic radiation with soil attributes. Thus, this study aimed at evaluating the spectral response, at two data acquisition levels (terrestrial and orbital), of different soil classes across toposequences in the region of São Carlos and Ibaté, SP. For this purpose, georeferenced soil samples were collected at 319 points and three depths, and radiometric data were obtained in the laboratory using a spectroradiometer (spectral band 450–2500 nm). The same points sampled in the field in the surface layer were evaluated by the satellite image (ASTER). Based on the results it was possible to conclude that (a) coarse sand, clay, organic matter and color were strongly related with soil reflectance; (b) soil spectral data vary along the declivities; (c) soils of the same taxonomy order, but of different clay classes, have different spectral performances and can be discriminated by remote sensing.

Index terms: toposequence, soil attributes, reflectance.

INTRODUÇÃO

Parte da variabilidade dos índices de produção agrícola está associada, dentre outros fatores, com as características do solo e da paisagem. As alterações do solo ao longo da paisagem, juntamente com o manejo empregado, conduzem a mudanças nas suas propriedades e características, que, por sua vez, resultam em variações na produtividade agrícola.

Com o objetivo de acelerar o processo de identificação e caracterização dos solos na paisagem, pode-se utilizar o sensoriamento remoto. Neste caso, é avaliado o seu comportamento ou assinatura espectral, que depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica. Os principais constituintes que afetam seu comportamento espectral são a matéria orgânica (Dalmolin, 2002) e os óxidos de Fe (Demattê et al., 2003). Segundo Stoner & Baumgardner (1981), a reflectância do solo é uma propriedade cumulativa derivada do comportamento espectral inerente da combinação heterogênea de seus componentes, como tamanho de partícula, estrutura do solo, rugosidade superficial, umidade, teor de matéria orgânica, teor de minerais carbonatados, presença ou não de quartzo e dos óxidos de Fe.

Fatores como a mineralogia da fração argila (Drury, 2001; Chabrilat et al., 2002), o tamanho da partícula (Drury, 2001; Meneses & Madeira Netto, 2001), a rugosidade e a umidade do solo (Hummel et al., 2001; Muller & Décamps, 2001) também influem na resposta espectral do solo.

Para poder quantificar os atributos do solo a partir de sua resposta espectral, é necessário ter um bom entendimento das relações entre seus componentes e

sua radiação eletromagnética. Desta forma, vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos nesta linha de pesquisa, porém, como o solo é um corpo complexo que apresenta uma grande variabilidade de seus constituintes, é preciso mais informações que elucidem cada vez com mais exatidão a interação da radiação eletromagnética com os solos. Espera-se que, a partir da energia eletromagnética refletida, se possam diferenciar as classes de solo, uma vez que cada uma, como indivíduo, apresenta atributos diferenciadores. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento espectral de diferentes classes de solos da região de São Carlos e Ibaté, SP, conforme a posição na paisagem e o teor de algum de seus atributos, em diferentes níveis de aquisição dos dados terrestre (sensor FieldSpec) e orbital (ASTER).

MATERIAL E MÉTODOS

A área estudada localiza-se no Estado de São Paulo, nos municípios de Ibaté e São Carlos. É delimitada pelas coordenadas geográficas 21° 46' 55" S / 48° 09' 42" W e 22° 10' 08" S / 47° 48' 33" W. Apresenta aproximadamente 9.000 ha cultivados com cana-de-açúcar em altitudes variando de 500 a 950 m do nível médio do mar. O clima da região, segundo Köppen, é do tipo Cwa (subtropical com inverno seco e verão quente/úmido), precipitação pluvial e temperatura média anual de 1.500 mm e 23 °C, respectivamente. A litologia é representada principalmente pelas formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento) e Cobertura da Serra de Santana e Similares (Grupo Taubaté) (Bistrichi et al., 1981).

Foram amostrados 319 pontos com trado, em três profundidades, 0–20, 40–60 e 80–100 cm, designadas de camadas A, B e C, respectivamente, pelo método da transeção (toposseqüências), tendo por objetivo identificar os limites dos solos (Embrapa, 1995). Complementando estas amostragens, foram descritos 55 perfis representativos em trincheiras. As 957 amostras foram analisadas para determinar os teores de K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , H + Al e matéria orgânica, segundo método descrito em Raji et al. (2001), e fisicamente para determinar os teores de areia (grossa e fina), silte e argila (Camargo et al., 1987).

De posse desses resultados, foram estabelecidos limites entre as unidades de solos ao longo das toposseqüências. A classificação dos solos foi realizada seguindo os critérios estipulados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006). A cor do solo úmido foi obtida com colorímetro Minolta CR 300 para cor de Munsell. Na determinação das cores pelo colorímetro, matizes foram obtidos com valores decimais e contínuos, por isso foram determinados matizes intermediários para a classificação dos solos: matizes mais amarelos que 6.2YR foram considerados amarelos, matizes mais vermelhos que 6.2YR e mais amarelos que 3.7YR foram considerados vermelho-amarelos e, por fim, matizes mais vermelhos que 3.7YR foram considerados vermelhos.

A coleta de dados espectrais foi feita em dois níveis, usando-se o sensor terrestre FieldSpec para amostras de superfície e subsuperfície, e o sensor orbital ASTER apenas para amostras de superfície.

No nível orbital, foi utilizada uma cena do sensor ASTER (satélite TERRA), de 05/09/2003, bandas 1 a 8, sendo (em nm): B1: 520–600, B2: 630–690, B3: 760–860, B4: 1.600–1.700, B5: 2.145–2.185, B6: 2.185–2.225, B7: 2.235–2.285, e B8: 2.295–2.365. Para correção atmosférica da imagem e a conversão dos níveis de cinza para reflectância, foi utilizado o programa Atmospheric Correction Now - ACORN (AIG, 2001). Para obtenção dos dados espectrais orbitais da camada superficial do solo, foram extraídos os valores de reflectância de cada pixel ao longo das toposseqüências pré-estabelecidas sobre os mesmos pontos de amostragem realizados no campo.

Para coleta dos dados espectrais de laboratório, foi utilizado o sensor hiperespectral, FieldSpec Spectroradiometer, que recobre a faixa espectral entre 450 e 2.500 nm, com resolução espectral de 1 nm. As amostras foram secas em estufa a 45 °C, por 24 h, moídas e peneiradas (malha de 2 mm) para homogeneização dos efeitos da umidade e rugosidade. Depois deste processo, as amostras foram pesadas e acondicionadas em placas de petri de 13,5 cm de diâmetro para serem feitas as leituras pelo sensor. Utilizou-se uma placa-padrão branca, com 100 % de reflectância. Foi realizada a leitura espectral das amostras de terra retiradas dos mesmos pontos localizados no campo, e também avaliados pelo sensor

orbital para comparação. A relação entre a energia refletida pelo alvo e a energia refletida pela placa de referência gerou o fator de reflectância bidirecional.

Foram relacionadas as informações espectrais das amostras de terra (orbital e terrestre) com os atributos do solo. Para isso, foram estabelecidos referências para cada um atributo. Em relação à granulometria, foram usadas cinco classes texturais que melhor discriminassem os solos. Estas tiveram as seguintes faixas do teor de argila ($g\ kg^{-1}$): (1) muito argilosa: > 600 ; (2) argilosa: ≥ 350 e ≤ 600 ; (3) média-argilosa: ≥ 250 e < 350 ; (4) média-arenosa ≥ 150 e < 250 ; (5) arenosa: < 150 . No caso específico do Neossolo Quartzarênico, foram estabelecidas apenas duas classes granulométricas para os teores de argila ($g\ kg^{-1}$): (1) < 150 e ≥ 100 e (1') < 100 . Para a fração de areia grossa (AG), foram estabelecidos três intervalos do teor de AG ($g\ kg^{-1}$): (1) < 150 de AG; (2) ≥ 150 e ≤ 450 de AG e (3) > 450 de AG. No caso das cores, foram estabelecidas quatro classes, de acordo com os matizes do solo: (1) 10YR–7.4YR; (2) 7.5YR–4.9YR; (3) 5YR–2.6YR e (4) 2.5YR–10R.

As 319 amostras de terra foram agrupadas sempre de acordo com as classes pré-estabelecidas para cada camada do solo avaliada, e determinadas as médias das bandas espectrais (FieldSpec e ASTER) em função desses referenciais para comparação.

Similarmente, após a classificação de todas as amostras de solo, estas foram agrupadas nas mesmas classes de solo e textura (Embrapa, 2006). Foi determinada a média da intensidade de reflectância para cada uma das bandas e para cada classe de solo. (FieldSpec e ASTER).

Para a verificação das diferenças entre as curvas espectrais, foi realizado o teste de médias entre elas, utilizando-se o programa Statistical Analysis System (SAS, 1999) em diferentes faixas de comprimento de onda. No caso do sensor terrestre, devido ao grande número de bandas, foram simuladas as bandas do sensor ASTER, tirando-se as médias da reflectância correspondente a cada uma das bandas.

Utilizando-se curvas de nível da área de estudo, foi gerado um modelo digital de elevação do terreno (MDE). A partir desse modelo, foram geradas 22 toposseqüências utilizando a extensão Z-Profile do software ArcMap 8.3 (ESRI, 2000). Para as toposseqüências mais completas e com solo exposto na imagem, foi elaborado um desenho esquemático para representá-las na paisagem (Figuras 1 e 2). Sobre esses desenhos, foram inseridas as curvas espectrais obtidas pelo sensor terrestre (FieldSpec) nas três profundidades de amostragem, avaliando-se o comportamento espectral dos solos em profundidade e ao longo do relevo. Para esses pontos, foram elaboradas as curvas espectrais da camada superficial a partir dos dados do sensor FieldSpec e do sensor ASTER, comparando-se os sensores entre si (apenas pelas curvas espectrais da camada superficial).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização química e granulométrica dos solos

Na camada superficial (A), todos os Latossolos de textura mais argilosa apresentaram maior teor de matéria orgânica (MO) do que os solos pertencentes à mesma classe, porém com diferentes texturas. Foi o

caso do Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa (LVA2), que apresentou 22 g kg⁻¹ de MO, enquanto os solos de textura média-argilosa (LVA3) e média-arenosa (LVA4) apresentaram teores de 20 e 12 g kg⁻¹ de MO, respectivamente (Quadro 1). A mesma situação foi observada para a maioria dos outros solos. A saturação por bases, na maioria dos casos, apresentou maior valor na camada superficial do solo, principalmente por sofrer grande influência das práticas de manejo, como calagem e gessagem.

Quadro 1. Média dos atributos das principais classes de solo estudadas

Classe ⁽¹⁾ do solo	Camada ⁽²⁾	Granulometria					Química			Cor		
		Areia			Silte	Argila	F ₂ O ₃ ⁽³⁾	MO ⁽⁴⁾	V ⁽⁵⁾	Munsell ⁽⁶⁾		
		Grossa	Fina	Total						Matiz	Valor	Croma
					g kg ⁻¹				%			
LA2	A	330	300	630	10	360		21	55	8.4YR	3.4	1.8
	B	300	280	610	14	376		14	37	2.9YR	3.2	2.7
	C	290	280	570	63	367		12	19	2.5YR	3.1	2.5
LV2	A	152	268	420	133	447	84	20	45	3.4YR	3.2	2.1
	B	126	226	352	239	409	77	12	33	3.2YR	3.2	2.4
	C	146	226	372	161	468	84	9	36	2.9YR	3.2	2.5
LVA2	A	287	203	490	102	408	53	22	53	5.2YR	3.3	2.3
	B	243	200	443	143	414	53	14	30	4.9YR	3.4	2.5
	C	227	190	417	133	450	56	12	36	4.9YR	3.3	2.6
LVA3	A	395	250	645	33	322	20	20	43	6.4YR	3.3	1.7
	B	420	232	652	57	291	16	14	21	6YR	3.5	2.3
	C	403	205	608	77	316	23	11	20	5.9YR	3.5	2.5
LVA4	A	377	399	775	44	180		12	47	5.3YR	3.4	1.8
	B	396	384	780	26	194		8	32	5.3YR	3.5	2.2
	C	371	388	760	35	205		6	29	5.3YR	3.5	2.4
LVf2	A	120	243	363	166	471	249	20	42	2.2YR	3.2	2.0
	B	110	293	403	134	462	246	14	29	4.7YR	3.3	2.7
	C	117	277	393	133	474	234	11	32	4.6YR	3.3	2.7
NVf1	A	20	117	137	366	497	145	23	58	2.8YR	3.1	2.5
	B	17	70	87	325	588	145	14	69	2.6YR	3.3	3.1
	C	17	73	90	280	630	150	10	71	2.8YR	3.2	2.9
PA4	A	532	300	832	9	159		7	34	8.2YR	3.2	1.9
	B	480	280	760	13	227		5	39	8YR	3.5	2.5
	C	419	280	699	43	258		4	38	7.8YR	3.8	2.6
PVA3	A	460	323	783	60	157	31	12	51	5YR	3.2	1.9
	B	380	333	713	70	217	57	9	36	4.5YR	3.3	2.8
	C	333	307	640	46	314	54	7	36	4.3YR	3.4	2.9
PVAL3	A	310	340	650	49	301		21	67	4.9YR	3.0	1.9
	B	430	300	730	49	221		11	59	4.1YR	3.1	2.2
	C	320	300	620	116	264		10	61	3.6YR	3.1	2.4
RQ1	A	529	340	870	17	114		10	38	4.8YR	3.1	1.6
	B	533	308	840	21	139		6	23	4.3YR	3.2	2.2
	C	491	342	833	24	143		5	20	4.2YR	3.3	2.4
RQ1'	A	491	388	879	32	88	11	11	32	5.1YR	3.2	1.8
	B	465	415	880	22	98	8	7	16	5.4YR	3.2	1.7
	C	456	418	873	25	102	12	4	19	5YR	3.3	2.3

⁽¹⁾ Nomenclatura de acordo com Embrapa (2006). Os números que acompanham os símbolos das classes do solo indicam a classes granulométricas. ⁽²⁾ Camada A (0–20 cm); camada B (40–60 cm); camada C (80–100 cm). ⁽³⁾ Teores de Fe obtidos de levantamentos pedológicos do Estado de SP (Oliveira & Prado, 1984). ⁽⁴⁾ Matéria orgânica. ⁽⁵⁾ Saturação por bases. ⁽⁶⁾ Cores determinadas pelo padrão Munsell utilizando-se colorímetro.

Analisando os resultados de granulometria (Quadro 1), observa-se que os Latossolos apresentaram grande homogeneidade textural ao longo das camadas em relação ao teor de argila, conforme esperado, e os maiores valores deste atributo foram encontrados para os Nitossolos (630 g kg^{-1}) e os Latossolos férricos (474 g kg^{-1}). Parcela expressiva de solos com maior gradiente textural foram classificados como Argissolos (PA4, PVA3, PVAL3). Solos com altos teores de areia e baixos teores de argila, como os RQs, também foram identificados e classificados em percentagem significativa da área.

A topossequência 1 (Figura 1) caracteriza-se pela influência dos arenitos conglomeráticos do Grupo Taubaté e do diabásio da Formação Serra Geral. Na parte mais alta desta topossequência (770 m), encontra-se Latossolo Amarelo distrófico textura média-argilosa (LAd3), apresentando baixa saturação por bases, matiz 7.5YR, estrutura fraca e com pouca diferenciação no conteúdo de argila entre horizontes. Na cota de 730 m, encontra-se Argissolo Vermelho distrófico latossólico textura média-arenosa (PVdL2). Um horizonte B latossólico (B_w) logo abaixo do horizonte B textural desse solo indica a transição de diferentes classes de solos ao longo da vertente. Seguindo na topossequência 1 (Figura 1), nota-se o Latossolo Vermelho distroférrico textura argilosa

(LVdf2), com alto teor de Fe devido à influência do material de origem, o diabásio. Logo em seguida, na vertente, há Nitossolo Vermelho Eutroférrico latossólico textura argilosa (NVefL2), um solo intermediário ou de transição entre o LVd4, que se encontra na parte mais alta, e o próprio NVef2, que está situado em cotas menores (680 m). A hipótese mais aceita para esta variação lateral na topossequência 1 é a de que acontece uma circulação lateral da solução do solo em uma vertente, ou seja, no topo acontece uma circulação preferencialmente vertical, mas, quando o declive se acentua, o fluxo vertical diminui e o fluxo lateral tem início, sendo então de maior expressão em toda a encosta até o sopé. Este fluxo, junto com ciclos de umedecimento e secagem do solo, favorece a iluviação lateral de argilas por processos de dispersão e floculação deste material, o que provoca o desenvolvimento de um horizonte B_n a partir de um horizonte B_w (Vidal-Torrado & Lepsch, 1993).

A topossequência 2 (Figura 2) caracteriza-se por altitudes que variam de 600 a 700 m, com extensão de 2.550 m. Os arenitos finos a médios da formação Botucatu originaram o Neossolo Quartzarênico distrófico, que apresenta textura com menos do que 150 g kg^{-1} de argila e mais do que 800 g kg^{-1} de areia total. Devido à sua constituição essencialmente de

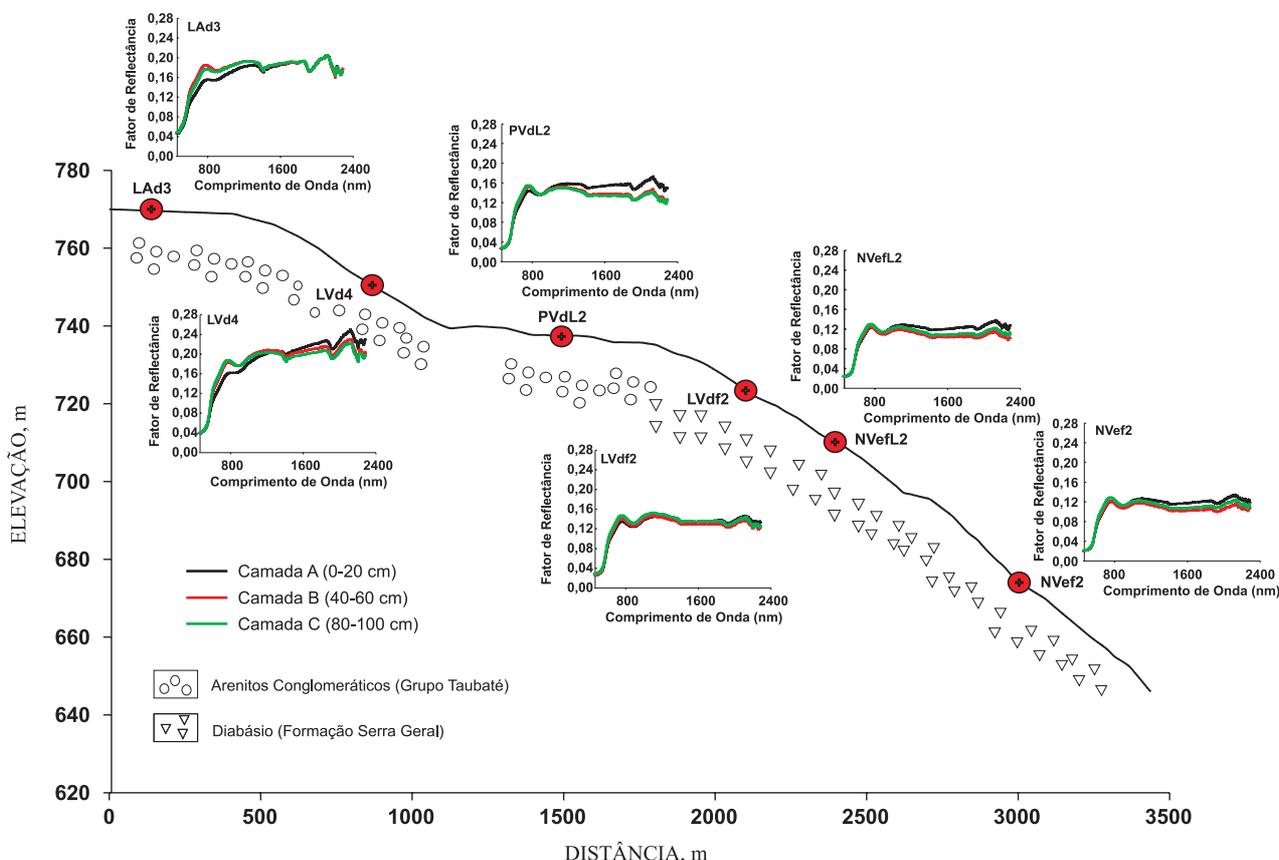


Figura 1. Variabilidade longitudinal e curvas espectrais dos solos em diferentes camadas na topossequência 1 da área de estudo.

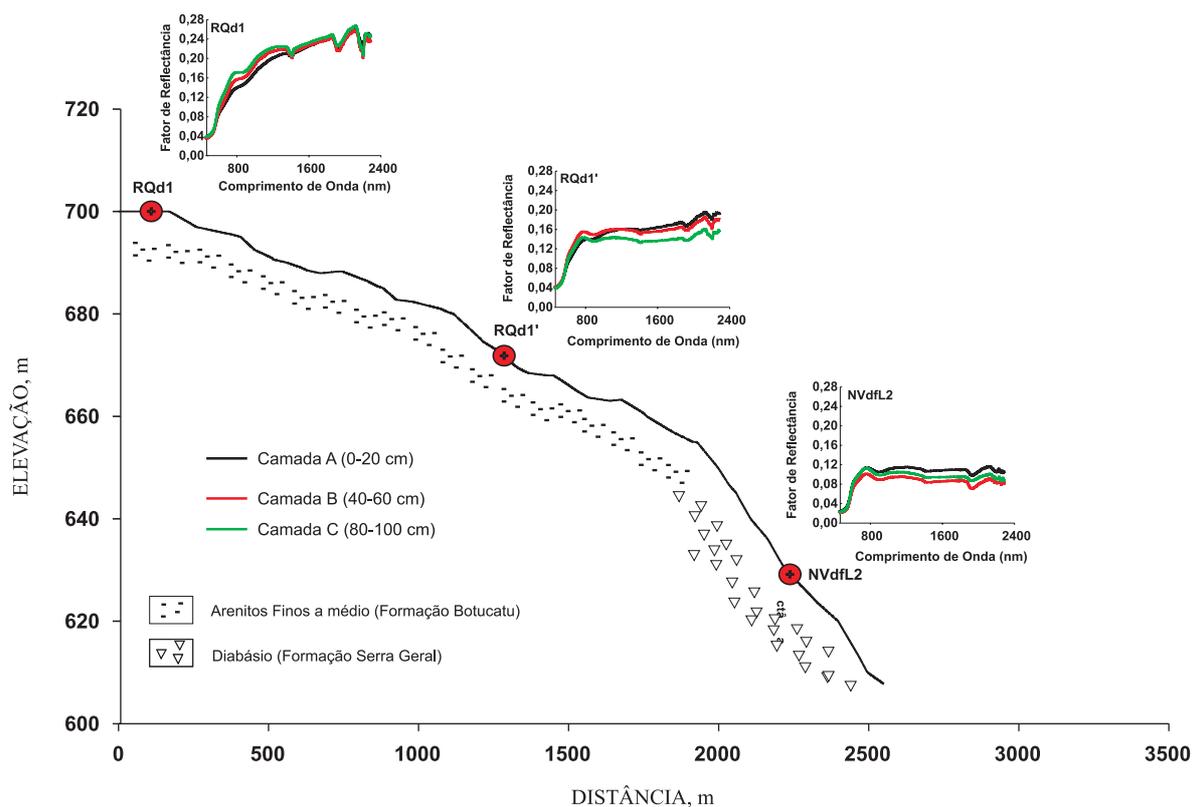


Figura 2. Variabilidade longitudinal e curvas espectrais dos solos em diferentes camadas na topossequência 2 da área de estudo.

quartzo, este solo geralmente é pobre em nutrientes, com uma baixa saturação por bases e apresenta um horizonte A fraco, seguido por um horizonte C solto e pouco diferenciado em termos de estrutura, cor e textura. Na posição inferior da vertente, encontra-se o solo formado a partir do diabásio da formação Serra Geral (NVdfL2), com coloração 2.5YR.

Atributos do solo vs reflectância terrestre (FieldSpec) e Orbital (ASTER)

A distribuição do tamanho das partículas do solo e a presença de diferentes argilominerais influem na sua resposta espectral (Meneses & Madeira Netto, 2001). De maneira geral, os solos de textura arenosa tendem a ter maior intensidade de reflectância do que os argilosos, notadamente quando a areia é dominada por quartzo (Resende et al., 2005), e também devido aos baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de Fe. As curvas espectrais médias das amostras de terra com maiores teores de argila resultaram em menor intensidade de reflectância tanto pelo sensor terrestre quanto pelo orbital (Figura 3a). Esses dados corroboram os resultados obtidos por Barnes & Baker (2000), que obtiveram elevadas correlações positivas entre a reflectância do solo e o aumento da fração areia e elevadas correlações negativas com o aumento da fração argila. As bandas 6 e 7 simuladas do sensor orbital (ASTER), a partir dos dados espectrais obtidos pelo sensor terrestre (FieldSpec), discriminaram

significativamente a classe de teor de argila $< 150 \text{ g kg}^{-1}$ das demais. Para os dados espectrais do sensor ASTER, as bandas 3, 4, 5 e 7 geraram os melhores resultados, e os dados espectrais de solos com teores de argila $< 150 \text{ g kg}^{-1}$ diferiram daqueles com teor de 600 a 350 g kg^{-1} e $> 600 \text{ g kg}^{-1}$ (Figura 3a). A explicação para este comportamento, segundo Meneses & Madeira Netto (2001), é que há uma relação inversa entre o tamanho das partículas e a reflectância. Quanto menor for o tamanho das partículas, maior será o albedo dos solos, isto é, os materiais com partículas menores apresentam superfície mais uniforme, com menor número de poros para reter a luz incidente, enquanto a maior granulometria cria superfícies mais irregulares, com sombreamentos e maior retroespalhamento interno da luz.

Houve aumento da intensidade de reflectância do solo, conforme os teores de areia grossa foram aumentando, e diminuição proporcional com os teores de areia fina (Figura 3b). Este comportamento foi encontrado tanto para as curvas do FieldSpec quanto do ASTER. As curvas diferiram significativamente umas das outras nas bandas 4, 5, 6 e 7 para o sensor FieldSpec e 1, 3, 6, 7 e 8 para o sensor ASTER. Esses resultados concordam com os de Stoner (1979), que verificou, em solos de textura média, aumento da intensidade de reflectância com o aumento do tamanho da partícula (da fração areia) e a diminuição da proporção de areia fina a muito fina.

A matéria orgânica é um constituinte primário da coloração, apresentando portanto uma estreita relação com a reflectância do solo. Assim, como Dalmolin (2002), observou-se aumento na resposta espectral dos solos quando houve decréscimo do teor de matéria orgânica (Figura 3c). Demattê et al. (2003) observaram que a remoção da matéria orgânica do solo promove aumento da intensidade de reflectância em todo o espectro analisado para diversas classes de solo avaliadas. As respostas espectrais do solo para a matéria orgânica apresentaram o mesmo comportamento para os dois sensores utilizados (teores maiores de matéria orgânica resultaram em menor reflectância da luz). As bandas espectrais 5, 6, 7 e 8 foram as que promoveram maior diferenciação entre as diferentes classes de matéria orgânica, isto é, onde há possibilidade de discriminar os diferentes teores de matéria orgânica ao longo da curva espectral.

A cor é uma propriedade largamente utilizada para classificar e fazer interpretações sobre os solos. Os atributos matéria orgânica e óxidos de Fe estão intimamente relacionados à tal propriedade. O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006) utiliza os limites de matiz da cor Munsell (que refletem a proporção de hematita e goethita) para

diferenciar classes de solo. Para uniformização e maior objetividade na identificação das cores, usam-se escalas de padrões comparativos, sendo a mais empregada a escala Munsell para solos. O componente matiz representa a gama de cor do espectro solar, que traduz o comprimento de onda dominante da luz refletida por determinado corpo. Observou-se que amostras de terra com matizes mais vermelhos apresentaram menor intensidade de energia eletromagnética refletida, e aquelas com matizes mais amarelos, maior intensidade (Figura 3d). Estes resultados concordam com Madeira Netto & Baptista (2000), que afirmam que a hematita e a goethita apresentam comportamento espectral diferente, principalmente na região do visível e do infravermelho próximo. O sensor FieldSpec separou as curvas em maior número de bandas (1, 2 e 3) do que o sensor ASTER (banda 4). A curva média dos matizes entre 2.5YR-10R apresentou, em todo o espectro, baixa intensidade de reflectância resultante do predomínio da hematita, podendo ter sido também influenciada por minerais opacos, como a magnetita e a ilmenita, concordando com os resultados obtidos por Fontes & Carvalho Júnior (2005). Fontes et al. (2000) afirmam que solos derivados de rochas máficas, como é o caso de boa parte desses solos, podem apresentar magnetita e

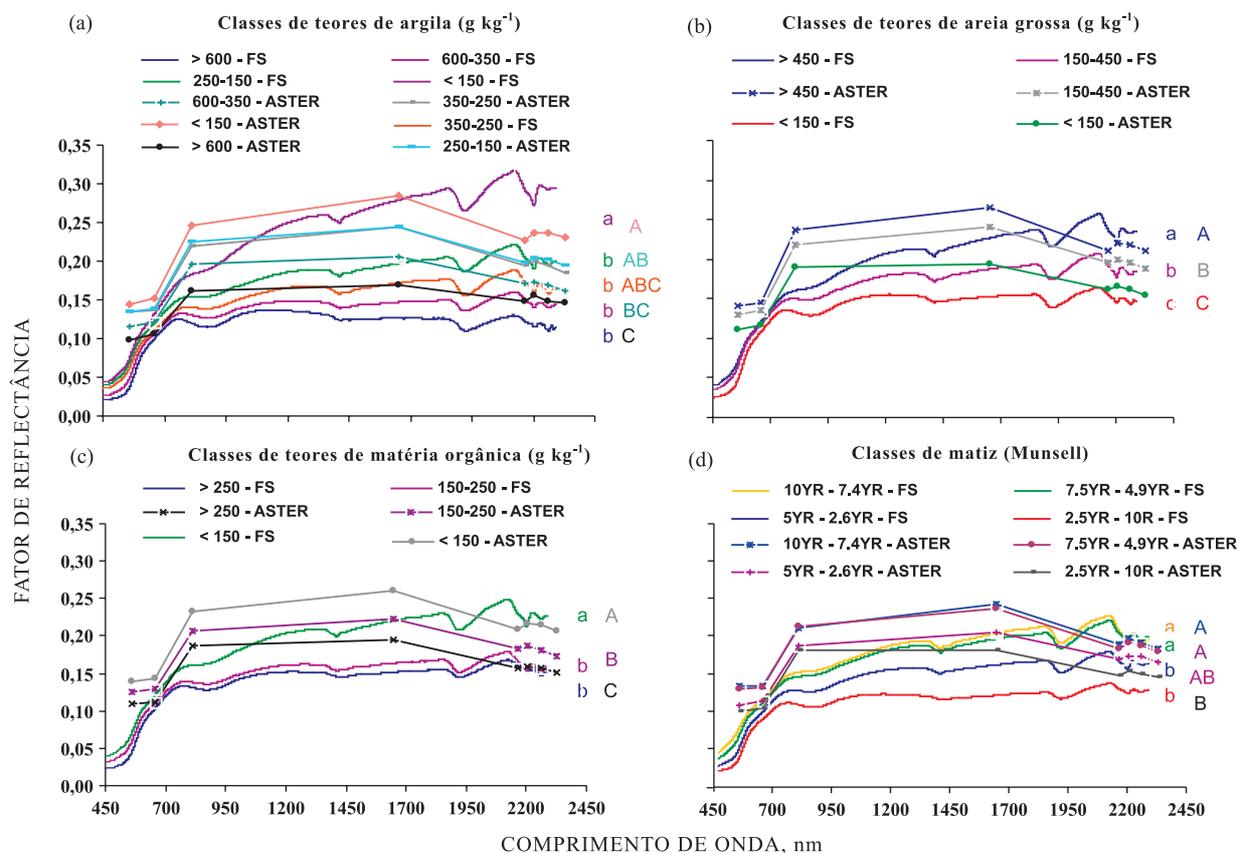


Figura 3. Variação dos atributos do solo e sua reflectância orbital (ASTER) e terrestre FieldSpec (FS). Mesma letra minúscula não difere significativamente a 5 % pelo teste de Tukey para a banda de 2.260 nm (FieldSpec). Mesma letra maiúscula não difere significativamente a 5 % pelo teste de Tukey para a banda de 2.260 nm (ASTER).

ilmenita inclusive na fração de areia e silte. A concavidade menos acentuada em 450 nm e maiores intensidades de reflectância em 900 nm, representadas pelos solos com matiz mais amarelo, indicam a predominância de goethita sobre a hematita, concordando com Fontes & Carvalho Júnior (2005). Esses autores concluíram que os matizes dos solos apresentam uma estreita relação com o teor de óxidos de Fe e com a relação hematita/goethita.

As bandas com maior comprimento de onda (6, 7 e 8) foram as que melhor separaram as curvas espectrais para quase todos os atributos, exceto para a cor do solo, separada pelas bandas 1, 2 e 3. Isso ocorreu porque as bandas 1, 2 e 3 são da região do visível, mais relacionadas à cor, e as bandas 6, 7 e 8 estão relacionadas mais aos minerais do solo.

Classes de solo vs reflectância terrestre e orbital

A reflectância do solo, não somente no comprimento de onda da luz visível, mas também de todos os outros comprimentos da faixa do espectro óptico, é uma propriedade cumulativa que deriva do comportamento espectral dos constituintes minerais, orgânicos e fluidos, que, combinados, compõem o solo (Meneses & Madeira Netto, 2001).

O Neossolo Quartzarênico por definição é um solo de textura arenosa, com baixos teores de matéria orgânica e de óxidos de Fe, com mineralogia na fração de areia constituída predominantemente por quartzo (Resende et al., 2005), resultando numa elevada intensidade de reflectância (Figuras 4 e 5). Esta classe de solo foi a que mais se diferenciou estatisticamente das outras, principalmente no nível terrestre (Figura 4b), concordando com os dados obtidos por Demattê (2002).

Comparando os Latossolos, observa-se que os LVAs e os LAs tenderam a apresentar maior intensidade de reflectância, e os LVs a absorver maior quantidade de REM em níveis terrestre e orbital (Figuras 4a e 5a). As diferenças entre o teor de argila entre os Latossolos, cujo teor aumenta do LA (média para a camada A = 290 g kg⁻¹) para o LVA (média para a camada A = 304 g kg⁻¹) e para o LV (média para a camada A = 314 g kg⁻¹), também podem influenciar significativamente sua resposta espectral. Outro fator importante relacionado à baixa intensidade de reflectância dos LVs é a presença de hematita e minerais opacos, como a magnetita, que absorvem energia em todo o espectro eletromagnético, conforme verificado por Demattê et al. (2001). Por outro lado, os solos apresentam bandas de absorção pouco intensas em 1.400 e 1.900 nm e mais altas em 2.200 nm, demonstrando sua mineralogia caunilítica, concordando com os resultados obtidos por Fiorio (2002). Dentro da mesma classe de solo, observa-se uma tendência daqueles com texturas mais arenosa a apresentarem maior intensidade de reflectância ao longo de quase toda curva (Figuras 4b e 5b).

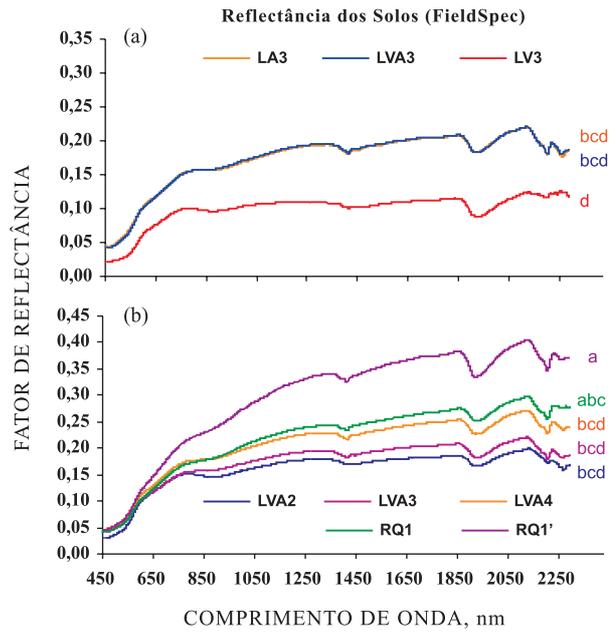


Figura 4. Reflectância de diferentes subordens de Latossolos com classes texturais semelhantes (a) e de mesmas subordens de solos, porém com diferentes texturas (b), obtidas pelo sensor FieldSpec para amostras da camada superficial. Mesma letra não difere significativamente a 5 % pelo teste de Tukey para a banda de 2.260 nm.

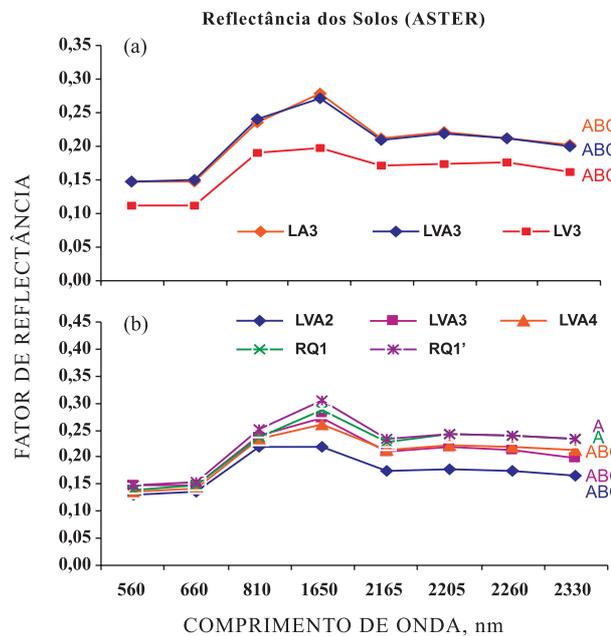


Figura 5. Reflectância de diferentes subordens de Latossolos com classes texturais semelhantes (a) e de mesmas subordens de solos, porém com diferentes texturas (b), obtidas pelo sensor ASTER para amostras da camada superficial. Mesma letra não difere significativamente a 5 % pelo teste de Tukey para a banda de 2.260 nm.

Os Argissolos apresentaram um comportamento espectral diferente daquele dos Latossolos, conforme a classe textural e suas variações (Figuras 6a e 6b). Observa-se que o LVA4 apresentou níveis mais altos de reflectância do que o PVA3 e diminuição constante da intensidade da reflectância de suas curvas da camada superficial para as camadas mais inferiores analisadas (Figura 6a). No PVA3, a camada A apresentou um comportamento espectral diferente daquele das camadas B e C, provavelmente em função do maior incremento no teor de argila ao longo do perfil (Figura 6b).

Analisando as curvas espectrais de solos com elevados teores de óxidos de Fe, como LVf2 e NVf2, observa-se que em superfície não houve grandes diferenças visuais entre os solos (Figura 7a), mas, em subsuperfície (camadas B e C), houve diminuição da intensidade de reflectância e tendência para suavização das feições de reflectância nas curvas do NVf2 (Figura 7b). Este comportamento diferenciado pode ser atribuído a menor teor de argila e a maior teor de areia no Latossolo, que favorecem maiores índices de reflectância, e à maior uniformidade textural, que contribui para que as curvas de reflectância sejam bastante similares. Já no Nitossolo, além do teor de argila ser mais alto desde a superfície, as maiores taxas de incremento de argila em profundidade fazem com que ocorram intensidades de

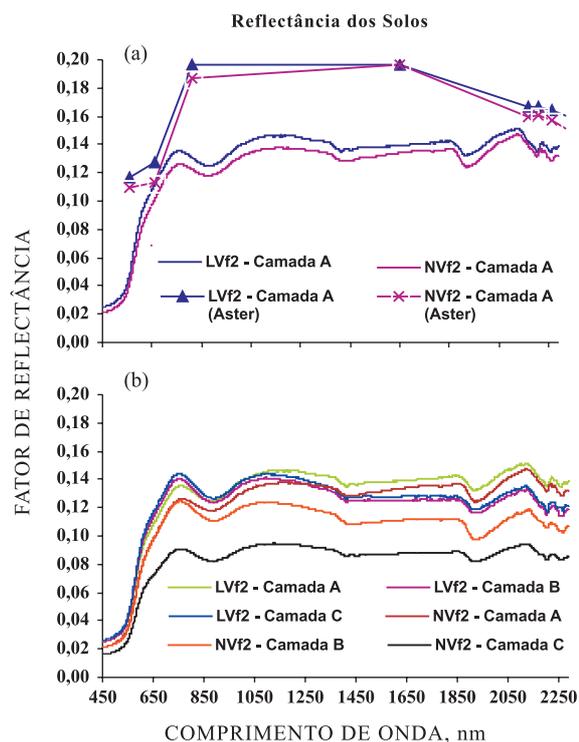


Figura 7. Comportamento espectral de diferentes classes de solos, em superfície (ASTER e FieldSpec) e em subsuperfície (FieldSpec).

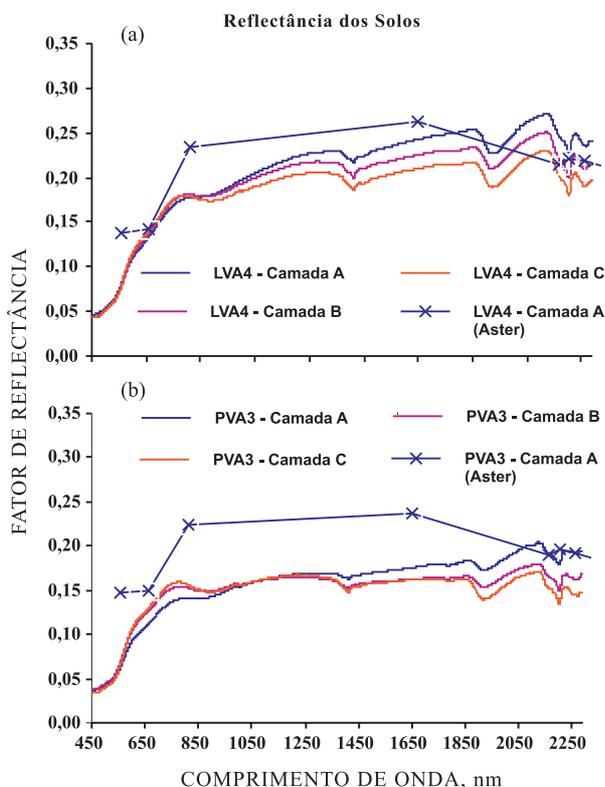


Figura 6. Comportamento espectral de diferentes classes de solos, em superfície (ASTER e FieldSpec) e em subsuperfície (FieldSpec).

reflexões mais baixas do que nos Latossolos e maior diferenciação entre as curvas com o aumento do teor de argila (Figura 7b).

Variação espectral em profundidade

A caracterização de solos num levantamento tradicional pressupõe a avaliação das amostras em profundidade. Portanto, para caracterização dos solos, também foram analisadas as curvas espectrais de amostras em diferentes profundidades (Figuras 1 e 2). Verifica-se que no LAd3 (Figura 1), as camadas da subsuperfície (40–60 e 80–100 cm) apresentaram intensidades de reflectância mais elevadas em relação à camada de superfície em parte do espectro eletromagnético. Isto ocorre devido ao fato de o teor de MO diminuir em profundidade. Demattê et al. (2003) e Coleman & Montgomery (1987) verificaram que, em solos muito argilosos, ocorre diminuição da reflectância em superfície (com maior teor de matéria orgânica) em relação à segunda camada (com pouca matéria orgânica) na faixa entre 400 e 1.200 nm. Já o NVefL2 e NVef2 apresentaram maior intensidade de reflectância na camada superficial, neste caso, o forte efeito da coloração da hematita, comum neste tipo de solo, pode ter sobreposto o efeito da MO, concordando com Fontes & Carvalho Júnior (2005).

No Argissolo (PVdL2), a diminuição da intensidade de reflectância nas camadas inferiores deve-se ao aumento do teor de argila em subsuperfície. Como os

Argissolos apresentam um gradiente textural entre as camadas, observa-se que a camada A possui maior teor de areia, resultando em maior intensidade de reflectância do que as camadas B e C (Figura 1).

Os Neossolos Quartzarênicos, por causa de baixa diferenciação textural entre horizontes, apresentam comportamento espectral bastante similar em profundidade. Apenas na Camada A, onde há maior acúmulo de MO, há menor intensidade de reflectância (Figura 2). Verifica-se esta mesma classe de solo em posições diferentes no relevo (RQd1 e RQd1') e, apesar de terem a mesma classificação taxonômica, apresentaram um comportamento espectral um pouco diferenciado quanto à intensidade da radiação eletromagnética (REM) refletida. O RQ situado nas cotas mais baixas apresenta alguma influência do diabásio na sua formação, resultando em uma cor um pouco mais avermelhada e um teor de argila um pouco maior, sem, contudo, ser o suficiente para mudar de ordem, mas o suficiente para alterar seu comportamento espectral em relação ao RQ situado nas cotas mais altas da topossequência.

Nos LVs, por apresentarem de forma geral pouca diferenciação entre os horizontes, sendo solos que apresentam boa drenagem interna e elevados teores de óxidos de Fe, observou-se pequena variação entre suas curvas espectrais em profundidade (Figura 1). Nota-se, inclusive, que as curvas espectrais das três camadas analisadas para o LVdf2 são praticamente iguais, por serem desenvolvidas de rochas máficas que

podem resultar em teores significativos de minerais opacos, como a magnetita e a ilmenita (Meneses & Madeira Netto, 2001).

Variação espectral ao longo de diferentes topossequências

Na topossequência 1 (Figura 1), observa-se a influência dos materiais de origem, arenitos conglomeráticos e diabásios na diferenciação dos solos. A intensidade da reflectância dos solos ao longo do relevo está sendo influenciada basicamente pela textura, destacando-se o LAd3 e o LVd4, situados na porção mais alta do relevo, com baixos teores de argila e altos teores de areia, resultando em maior energia eletromagnética refletida. Nas posições mais baixas do relevo, a presença de solos derivados do intemperismo do diabásio, com maiores teores de argila e de óxidos de Fe, resulta numa menor intensidade de reflectância. Quando comparada a intensidade de reflectância entre os dois sensores estudados, observa-se comportamento similar entre as curvas, exceto para dois solos, LAd3 e LVd4 (Figura 8).

A topossequência 2 (Figura 2) mostra claramente a alteração espectral de solos em posições diferentes no relevo, também afetada pelo material de origem. Na parte mais alta da topossequência, encontra-se Neossolo Quartzarênico distrófico (RQd1), com elevada intensidade de reflectância devido a sua textura mais arenosa, pois são solos profundos e essencialmente

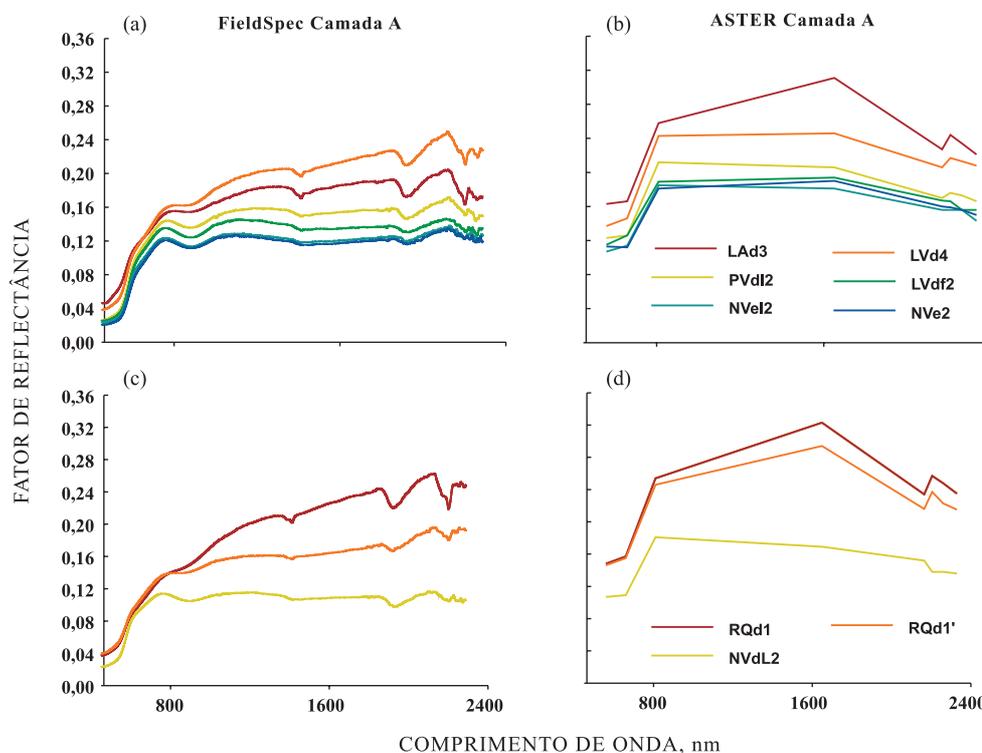


Figura 8. Avaliação da reflectância espectral de diferentes classes de solos por diferentes tipos de sensores (terrestre e orbital).

quartzosos. Os perfis são de extrema simplicidade, limitando-se a diferenciação à expressão do horizonte A e C. Na parte inferior do relevo, onde ocorre o Nitossolo Vermelho distroférrico latossólico (NVdFL2), constata-se maior absorção da REM, tanto em superfície quanto em subsuperfície, pela maior presença de óxidos de Fe, teor de argila e hematita, inferida pela cor em 2.5YR (Quadro 1). O horizonte diagnóstico dos Nitossolos apresenta textura argilosa a muito argilosa (Quadro 1), sem incremento no teor de argila do horizonte A para o B, ou com pequeno incremento, porém não suficiente para caracterizar a relação textural exigida para o B textural. Apresenta estrutura em blocos ou prismática e transição gradual ou difusa entre horizontes.

Comparando-se a resposta espectral da camada A obtida pelos sensores FieldSpec e pelo sensor ASTER para os diferentes solos da topossequência 1, observa-se que as curvas, para um mesmo sensor, tem um comportamento similar (Figuras 8a,b), havendo apenas diferença na intensidade de reflectância, resultante da variação dos atributos de cada classe de solo. Expressivas diferenças na intensidade de reflectância são constatadas, por exemplo, entre solos da classe Nitossolo e os Latossolos Amarelo (LAd3) e Vermelho (LVd4) na maior parte do espectro analisado. Selecionando-se bandas apropriadas, é possível, portanto, discriminar as referidas classes de solo com teores mais altos de argila e óxidos de Fe, tais como os Latossolos férricos.

Comportamento similar das curvas, pelos dois sensores, também foi contatada para os solos da topossequência 2, cujas intensidades de reflectância são bastante distintas quando se comparam os Nitossolos com os Neossolos Quartzarênicos (Figuras 8c e 8d), o que pode constituir auxílio importante para a discriminação dessas classes em levantamentos de solo que utilizem informações de sensores orbitais.

Observa-se, por outro lado, que as curvas espectrais obtidas pelo sensor ASTER resultaram em maior intensidade de reflectância do que as curvas do sensor FieldSec, causadas provavelmente pela interferência da atmosfera na REM.

Assim, apesar da vantagem dos sensores terrestres em diagnosticar mais detalhes e detectarem variações nos atributos dos solos também em profundidade, os sensores orbitais, embora forneçam informações apenas da camada superficial, podem proporcionar informações importantes para a discriminação preliminar dos solos em levantamentos em grandes escalas.

CONCLUSÕES

1. Os atributos areia grossa, argila, matéria orgânica e cor mostraram boa relação com a variação da reflectância dos solos.

2. O aumento no teor de matéria orgânica, argila e óxidos de Fe do solo resultou na diminuição da intensidade de reflectância do solo. Em contrapartida, o incremento do teor de areia quartzosa aumenta a reflectância.

3. Ao longo das vertentes, observaram-se variações nos dados espectrais dos solos, que permitiram diferenciar classes de solos distintas.

4. O comportamento espectral dos solos em profundidade mostrou-se relacionado principalmente com o teor de matéria orgânica das camadas e com as variações nos teores de argila (e areia) ao longo do perfil.

5. Solos de diferentes ordens taxonômica, ou solos de mesma ordem, porém com classes texturais diferentes, apresentaram diferenças no comportamento espectral pelos dois sensores, podendo assim ser discriminados por sensoriamento.

6. As informações espectrais do sensor terrestre utilizado foram mais detalhadas, permitindo monitorar variações das características dos solos também em profundidade.

LITERATURA CITADA

- ANALYTICAL IMAGING AND GEOPHYSICS – AIG. ATMOSPHERIC CORRECTION NOW (ACORN) 3.12. Boulder, 2001. CD-ROM.
- BARNES, E.M. & BAKER, M.G. Multispectral data for mapping soil texture: Possibilities and limitations. *Appl. Eng. Agric.*, 16:731-741, 2000.
- BISTRICHI, C.A.; CARNEIRO, C.D.R.; DANTAS, A.S.L.; PONÇANO, W.L.; CAMPANHA, G.A.C.; NAGATA, N.; ALMEIDA, M.A.; STEIN, D.P.; MELO, M.S. & CREMONINI, O.A. Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1981. 1 mapa, Escala: 1: 500.000.
- CAMARGO, M.N.; KLANT, E. & KAUFFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. *B. Inf.*, 12:11-13, 1987.
- CHABRILLAT, S.; GOETZ, A.F.H.; KROSLEY, L. & OLSEN, H.W. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clays soils and the role of spatial resolution. *Remote Sens. Environ.*, 82:431-445, 2002.
- COLEMAN, T.L. & MONTGOMERY, O.L. Soil moisture, organic matter and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama. *Photogr. Eng. Remote Sens.*, 53:1659-1663, 1987.
- DALMOLIN, R.S.D. Matéria orgânica e características físicas, químicas, mineralógicas e espectrais de Latossolos de diferentes ambientes. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 151p. (Tese de Doutorado)

- DEMATTE, J.A.M. Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37:1445-1458, 2002.
- DEMATTE, J.A.M.; DEMATTE, J.L.I.; CAMARGO, W. P.; FIORIO, P.R. & NANNI, M.R. Remote sensing in the recognition and mapping of tropical soils developed on topographic sequences. *Mapping Sci. Remote Sens.*, 38:79-102, 2001.
- DEMATTE, J.A.M.; EPIPHANIO, J.C.N. & FORMAGGIO, A.R. Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. *Bragantia*, 62:451-464, 2003.
- DRURY, S.A. *Image interpretation in geology*. 3.ed. Cheltenham, Nelson Thornes, 2001. 290p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 2006. 306p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos: Normas em uso pelo SNLCS. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1995. 101p.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. *ARCGIS 8.3. Redlands*, 2000. 3 CD-ROM
- FIORIO, P.R. Dados radiométricos obtidos nos níveis terrestre e orbital na avaliação de solos. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2002. 198p. (Tese de Doutorado)
- FONTES, M.P.F. & CARVALHO JUNIOR, I.A. Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry, of highly weathered tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1162-1172, 2005.
- FONTES, M.P.F.; OLIVEIRA, T.S.; COSTA, L.M. & CAMPOS, A.A.G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*, 96:81-99, 2000.
- HUMMEL, J.W.; SUDDUTH, K.A. & HOLLINGER, S.E. Soil moisture and organic matter prediction of surface and subsurface soils using an NIR soil sensor. *Computers Electr. Agric.*, 32:149-165, 2001.
- MADEIRA NETTO, J.S. & BAPTISTA, G.M.M. *Reflectância espectral de solos*. LOCAL, Embrapa, 2000. 55p.
- MENESES, P.R. & MADEIRA NETTO, J.S., orgs. *Sensoriamento remoto: Reflectância dos alvos naturais*. Brasília, UnB/Embrapa Cerrados, 2001. 262p.
- MULLER, E. & DÉCAMPS, H. Modeling soil moisture – Reflectance. *Remote Sens. Environ.*, 76:173-180, 2001.
- OLIVEIRA, J.B. & PRADO, H. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos. II. Memorial Descritivo. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1984. 188p.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C. & REZENDE, S.B. *Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações*. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2005. 192p.
- SAS Institute. *Statistical Analysis System*. 8.02. Cary, 1999. CD-Rom.
- STONER, E.R. *Physicochemical, site and bi-directional reflectance factor characteristics of uniformly moist soils*. West Lafayette, Purdue University, 1979. 132p. (Tese de Doutorado)
- STONER, E.R. & BAUMGARDNER, M.F. Characteristics variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45:1161-1165, 1981.
- VIDAL-TORRADO, P. & LEPSCH, I.F. Morfogênese dos solos de uma topossequência com transição B latossólico/B textural sobre migmatitos em Mococa (SP). *R. Bras. Ci. Solo*, 17:109-119, 1993.