

FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS

INFLUÊNCIA DA MATÉRIA ORGÂNICA E DE FORMAS DE FERRO NA REFLECTÂNCIA DE SOLOS TROPICAIS⁽¹⁾

JOSÉ ALEXANDRE M. DEMATTÊ⁽²⁾; JOSÉ CARLOS NEVES EPIPHANIO⁽³⁾;
ANTONIO ROBERTO FORMAGGIO⁽³⁾

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo analisar o efeito dos conteúdos de matéria orgânica e de ferro cristalino e amorfo na reflectância espectral de solos tropicais ocorrentes no Brasil, pela utilização de um espectrorradiômetro em condições de laboratório, na faixa espectral entre 400 e 2500 nm. Os solos estudados foram: a) Nitossolo Vermelho, designado como TR (Typic Argiudoll); b) Latossolo Vermelho Eutroférico, LR (Typic Eutrorthox); c) Argissolo Vermelho, PE (Typic Argiudoll); d) Latossolo Vermelho, LE (Typic Haplorthox), subdividido em três categorias de acordo com a textura; e) Neossolo Quartzarênico, AQ (Typic Quartzipsamment) e f) Argissolo Vermelho-Amarelo, PV (Typic Paleudalf). Foram coletadas amostras superficiais e subsuperficiais, e analisadas quanto a características químicas, físicas e mineralógicas. As amostras de terra receberam quatro tratamentos químicos de dissolução seletiva: a) Testemunha; b) H₂O₂ para remoção de matéria orgânica; c) H₂O₂ + Oxalato Ácido de Amônio para remoção de matéria orgânica e de ferro amorfo; d) H₂O₂ e Ditionito-Citrato-Bicarbonato de Sódio para remoção de matéria orgânica, de ferro amorfo e de ferro cristalino. Esses tratamentos foram comparados utilizando suas respectivas curvas espectrais e simulação de dados do sensor TM (Thematic Mapper)/Landsat. A remoção da matéria orgânica promoveu aumento da reflectância em todo o espectro analisado, para todos os solos. A remoção da matéria orgânica e do ferro amorfo causou aumento geral da reflectância para todos os solos, mas sem modificar o formato das curvas espectrais. A remoção do ferro cristalino provocou aumento da reflectância na região inicial do espectro (até 1.000 nm), mas não nas regiões intermediárias (entre 1.000 e 1.900 nm) e final do espectro (acima de 1.900 nm). O ferro cristalino mostrou-se responsável pelas concavidades formadas em 400 nm e em 850nm. Os dados orbitais simulados mostraram que é possível discriminar diferenças relativas à matéria orgânica e às formas de ferro. O uso de radiometria de laboratório mostrou-se uma técnica rápida, não destrutiva, e pouco exigente em preparo para analisar feições de absorção por ferro e efeitos de matéria orgânica em curvas especiais de solos.

Palavras-chave: sensoriamento remoto, espectrorradiometria, bandas de absorção, fator de reflectância.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Livre Docência do primeiro autor apresentada à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba (SP), em dezembro de 1999. Recebido para publicação em 22 de maio de 2002 e aceito em 20 de agosto de 2003.

⁽²⁾ Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Departamento de Solos, Caixa Postal 9, 13418-900 Piracicaba (SP), Brasil. E-mail: jamdemat@ciagri.esalq.usp.br

⁽³⁾ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Divisão de Sensoriamento Remoto, Caixa Postal 515, 12201-970 São José dos Campos (SP), Brasil. E-mail: epiphani@ltd.inpe.br, formag@ltd.inpe.br

ABSTRACT

INFLUENCE OF ORGANIC MATTER AND IRON OXIDES ON THE SPECTRAL REFLECTANCE OF TROPICAL SOILS

The influence of organic matter and amorphous and crystalline iron contents on the reflectance (400 to 2500 nm) of various soils was evaluated. Studied soils were Typic Argiudoll (TR), Typic Eutrorthox (LR), Typic Argiudoll (PE), Typic Haplorthox (LE), Typic Quartzipsamment (AQ), and Typic Paleudalf (PV). Surface and subsurface soil samples were used in four conditions: a) as sampled; b) after removal of organic matter; c) after removal of the organic matter and the amorphous iron; and d) after removing organic matter and amorphous iron and crystalline iron. Reflectance factor was acquired from 400 nm to 2.450 nm and TM/Landsat spectral bands were simulated. Removal of organic and amorphous iron caused an overall increase of the reflectance along the spectrum, for all soils. Removal of crystalline iron caused the reflectance to increase in the first portion of the spectrum (400 to 1.000 nm), but not in intermediate (1.000 to 1.900 nm) and final portion of the spectrum (after 1.900 nm). Crystalline iron was responsible for concavities in the spectral region near 400 nm and 850 nm. Use of laboratory spectroradiometry proved to be a fast, non-destructive, and easy-to-prepare technique for analyzing absorption features caused by organic matter and iron forms in soils.

Key words: spectroradiometry, remote sensing, soil mineralogy, forms of iron, organic matter.

1. INTRODUÇÃO

Os solos estão presentes em grande parte das cenas de interesse para o sensoriamento remoto da superfície terrestre. Mesmo em situações em que o principal objetivo das análises é a vegetação suprajacente, as propriedades de reflexão dos solos têm que ser levadas em conta (YANG e PRINCE, 1997). A reflectância espectral dos solos tem participação ativa na interpretação dos resultados da análise de dados de sensoriamento remoto, como índices de vegetação (LYMBURNER et al., 2000) e modelos de mistura (SHIMABUKURO et al., 1998).

HUETE (1996) destaca a importância dos estudos espectrais em laboratório como base para a análise de dados obtidos a partir de satélites orbitais. Se tais análises eram justificáveis quando os sistemas sensores apresentavam baixa resolução espectral, atualmente são mais importantes, em vista de sistemas com maior capacidade de discriminação espectral, como o AVIRIS (Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer, com 220 bandas espectrais) e o Aster (Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer, com nove bandas entre 500 nm e 2.500 nm e vários ângulos de visada) (KING e GREENSTONE, 1999).

A reflectância dos solos é altamente variável ao longo da região que vai de 400 a 2.500 nm do espectro eletromagnético, onde opera a maioria dos sensores remotos ópticos. Considerando, por exemplo, as amostras de Typic Haplorthox (LR) e de Typic Quartzipsamment (AQ), conforme EPIPHANIO et al. (1992), é possível observar que suas reflectâncias variaram, respectivamente, de 0,10 a 0,20 na região do visível e de 0,10 a 0,60 na região do infravermelho médio.

Uma maneira de extrair informações sobre solos, com base em dados de sensoriamento remoto, refere-se ao estudo de certas feições de absorção de energia em determinados comprimentos de onda ou em regiões espectrais bem definidas. Para os solos estudados por EPIPHANIO et al. (1992), o LR praticamente não mostrou feições de absorção ao longo do espectro, enquanto a AQ apresentou nítidas feições de absorção por caulinita ao redor de 2.200 nm.

Tem sido demonstrado que a reflectância de solos é influenciada por diversos fatores, como textura e umidade (BOWERS e HANKS, 1965; VALERIANO et al., 1995), matéria orgânica e composição mineralógica (BEN-DOR et al., 1998).

Há certos componentes do solo que, por permitirem sua remoção, são passíveis de análises praticamente individualizadas quanto às suas influências nas curvas espectrais dos solos.

COURAUULT e GIRARD (1988) demonstraram que a remoção da matéria orgânica promoveu aumento de reflectância na faixa espectral de 400 nm a 2.500 nm. Nesse aspecto, OBUKHOV e ORLOV (1964) verificaram que os ácidos fúlvicos e húmicos eram influenciadores da reflectância. Por outro lado, a complexidade da constituição da matéria orgânica torna difícil a compreensão de aspectos mais detalhados da sua influência sobre a reflectância dos solos (HENDERSON et al., 1992). MADEIRA NETTO (1996) observa que a complexidade da matéria orgânica dos solos é muito grande e merece maiores estudos para compreender melhor seu comportamento espectral.

Além da matéria orgânica, outro elemento de grande importância no comportamento espectral dos solos, principalmente os tropicais, é o ferro.

O ferro é importante na classificação dos solos (EMBRAPA, 1999) e nas suas propriedades químicas, como por exemplo a adsorção específica (SUMNER, 1999). O ferro pode apresentar-se de diferentes formas (MELFI et al., 1979), as quais podem interferir na quantidade de energia eletromagnética refletida (DEMATTÊ e GARCIA, 1999).

A dinâmica dos elementos do solo, não só a matéria orgânica, mas também o ferro nos solos tropicais, ainda não está totalmente compreendida, o que dificulta a utilização prática de tais estudos. A adequada interpretação dos dados espectrais, tanto de laboratório quanto orbitais, depende de estudos básicos de comportamento espectral.

Assim, o objetivo principal do presente trabalho foi avaliar o impacto que a matéria orgânica e as formas de ferro têm sobre a reflectância dos solos de climas tropicais, notadamente naqueles de argila de atividade baixa.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo e solos estudados

A área de estudo localiza-se no Estado de São Paulo, às coordenadas 22°45' - 22°70' S e 48°60' - 49°47' W, compreendendo Lençóis Paulista, Macatuba e Bauru como municípios principais. Geologicamente, a região caracteriza-se por apresentar rochas da Formação Serra Geral, do tipo eruptivas básicas, as quais ocupam os vales dos rios, principalmente do Rio Lençóis, que corta a região. Sobre esta formação ocorrem extensas deposições de material de textura variável, sobretudo de textura média a arenosa pertencente à Formação Botucatu; há ocorrência também de material do Grupo Bauru (IPT, 1981).

Os solos estudados neste trabalho foram originados principalmente de rochas básicas e classificados de acordo com EMBRAPA (1999) e com SOIL SURVEY STAFF (1998) como: a) Nitossolo Vermelho, designado no presente trabalho como TR (Typic Argiudoll); b) Latossolo Vermelho Eutrófico, LR (Typic Eutrorthox); c) Argissolo Vermelho, PE (Typic Argiudoll); d) Latossolo Vermelho, LE (Typic Haplorthox), correspondente a Latossolo Vermelho-Escuro oriundo de material retrabalhados, amostrado segundo três categorias taxonômicas, de acordo com a textura em: a) LE1 (argila > 350 g.kg⁻¹); b) LE2 (220 < argila < 350 g.kg⁻¹); e c) LE3 (150 < argila < 220 g.kg⁻¹); (e) Neossolo Quartzarênico, AQ (Typic Quartzipsamment); e (f) Argissolo Vermelho-Amarelo, PV (Typic Paleudalf).

A figura 1 ilustra, esquematicamente, os passos metodológicos seguidos na presente pesquisa.

Após a descrição morfológica, as amostras foram coletadas de trincheiras, seguindo procedimentos indicados por LEMOS e SANTOS (1996). Foram amostrados os horizontes A, representando a camada superficial, de aproximadamente 0 a 20 cm, e B, representando a camada subsuperficial, de aproximadamente 40 a 60 cm. Em cada uma dessas profundidades coletaram-se quatro amostras simples, que deram origem a uma amostra composta, para as análises.

Para cada solo, foram obtidas repetições em diferentes trincheiras da região, sendo três perfis para o LR, seis para o TR, cinco para o PE, cinco para o PV, três para o LE1, seis para o LE2, cinco para o LE3 e seis para o AQ.

A análise química para determinar o pH em H₂O e CaCl₂, matéria orgânica, teor de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alumínio e hidrogênio seguiu os procedimentos descritos em RAIJ et al. (1987). Pela análise granulométrica foram determinados os teores de areia, silte e argila, usando o hidróxido de sódio como dispersante (CAMARGO et al., 1986).

Em amostras de terra representativas de cada unidade de solo, realizou-se o fracionamento químico da matéria orgânica, que determinou os ácidos fúlvicos e húmicos pela utilização dos ácidos de hidróxido de sódio e pirofosfato de sódio (DABIN, 1971).

O ataque sulfúrico seguiu o método descrito em CAMARGO et al. (1986). O ferro amorfo foi determinado através da extração com solução ácida de oxalato de amônio (MACKEAGUE e DAY, 1966), e o ferro cristalino com tratamento pelo ataque ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (HOLMGREN, 1967).

Para observar os efeitos do ferro e da matéria orgânica sobre a reflectância dos solos foram realizados diferentes tratamentos de remoção desse material das amostras, divididas em quatro subamostras de 20 g, as quais passaram pelos seguintes tratamentos e cujo método está descrito em JACKSON (1969): a) testemunha (A); b) remoção da matéria orgânica (AMO); c) remoção da matéria orgânica e do ferro amorfo (AOX); d) remoção da matéria orgânica, do ferro amorfo e do ferro cristalino (AD).

No tratamento (b) a matéria orgânica foi removida com água oxigenada a 30%; no (c), além da remoção da matéria orgânica com água oxigenada a 30%, removeu-se o ferro amorfo com oxalato de amônio. No tratamento (d), além das extrações descritas anteriormente, extraiu-se também o ferro cristalino usando ditionito citrato bicarbonato de sódio.

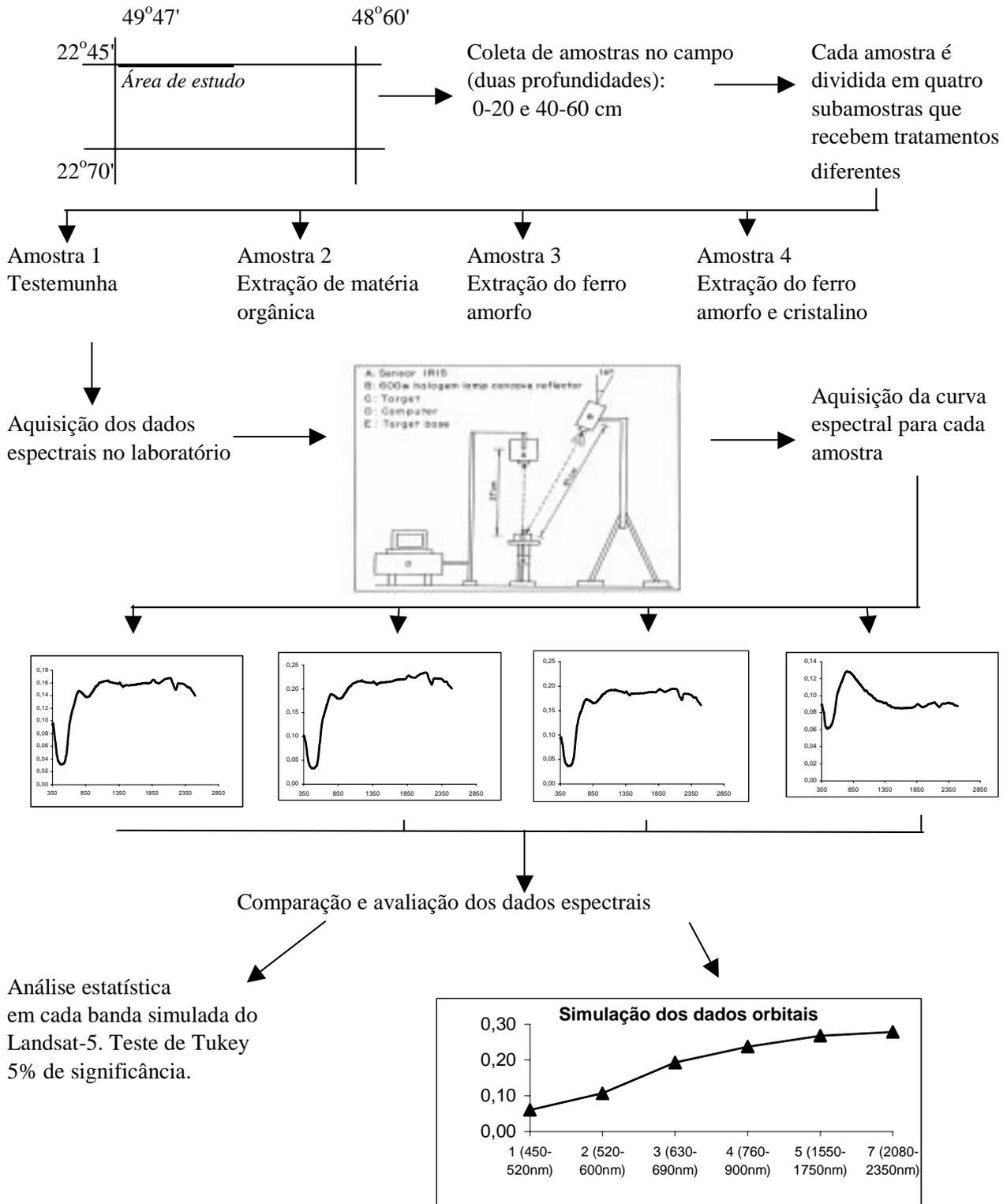


Figura 1. Descrição esquemática do método da pesquisa.

2.2 Aquisição e avaliação dos dados espectrais

Os dados espectrais foram obtidos com o espectrorradiômetro IRIS (Infrared Intelligent Spectroradiometer - Mark V) (GER, 1996). Antes das medições espectroradiométricas, foi feita uma preparação das amostras por secagem em estufa a 45 °C durante 24 horas (HENDERSON et al., 1992), seguida de moagem e peneiramento em peneira de malha de 2 mm. Em seguida, acondicionaram-se as amostras em placas de Petri com diâmetro de 11 cm e altura de 1,2 cm. O sensor foi posicionado verticalmente a uma distância de 27 cm acima da amostra, o que resulta em uma área de medição de 2 cm² no centro da placa de Petri. As amostras foram iluminadas 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 "spectralon" branca, de reflectância 100% e calibrada pela LABSPHERE (1996).

Para cada amostra, realizaram-se três medições da radiância, com um giro de 90° da amostra após cada medição. A média dessas três medições e mais a medição da placa de referência serviram para o cálculo do fator de reflectância bidirecional espectral (NICODEMUS et al., 1977). Os dados de cada amostra passaram por um processo de filtragem para eliminação de ruídos de alta frequência. Também foram realizadas medições de material orgânico, seguindo o mesmo procedimento.

2.3 Métodos estatísticos

A fim de avaliar as diferenças de reflectância espectral entre os tratamentos, para cada solo, aplicou-se o teste de Tukey, utilizando os resultados do horizonte A, de 0-20 cm, como suporte às discussões. Utilizando o programa "Statistical Analysis System" (SAS, 1989a, b), foram realizadas análises estatísticas dos dados espectrais, que estavam na forma de bandas semelhantes às do sensor TM/Landsat-5. Assim, nas faixas de comprimento de onda relativas a este sensor, determinaram-se valores médios de reflectância. Para cada banda aplicou-se o teste de Tukey entre as amostras-testemunha e as tratadas, semelhante aos procedimentos realizados por HENDERSON et al. (1992). A Figura 1 ilustra a seqüência metodológica adotada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização dos solos

Os LR são solos que ocorrem geralmente em relevos suave-ondulados a planos com boa drenagem. São profundos e bastante intemperizados. São solos muito argilosos e epieutróficos devido ao manejo, nos casos estudados (Quadro 1). As TR apresentam morfologia diferenciada, com macro e microestrutura forte, boa drenagem, ocorrem em relevo suave a ondulado, possuem CTC mais elevada que o LR, podem apresentar minerais 2:1, são muito argilosas e possuem alta porcentagem de saturação de bases (V%). Os PE são, morfologicamente, muito semelhantes às TR, sendo difícil diferenciá-los no campo; em laboratório, verifica-se que a TR possui maior teor de ferro que o PE.

Os PV são solos com gradiente textural, possuem textura arenosa a média, ocorrem em relevo ondulado, são mais suscetíveis à erosão. Os LE, aqui subdivididos em três (LE1, LE2 e LE3), em função da textura, são solos morfologicamente semelhantes aos LR, com B latossólico. A diferença principal refere-se à textura e ao teor de ferro, os quais influenciam diretamente na microagregação e estruturação do solo. Neste trabalho, as amostras de LE1 assemelham-se às de LR, enquanto as de LE3, às de AQ.

3.2 Matéria orgânica e reflectância

Os dados das análises físico-químicas e ataque sulfúrico das amostras estão inseridos nos quadros 1 e 2. Em todos os solos a remoção da matéria orgânica (tratamento AMO) mostrou como principal consequência o aumento do fator de reflectância em todo o espectro observado, quando comparado com a testemunha (tratamento A) (Figuras 2 e 3).

O teor de matéria orgânica no LR, por exemplo, caiu de 22,3 g.kg⁻¹, na testemunha, para 1,5 g.kg⁻¹ após sua remoção. MATHEWS et al. (1973) observaram que em solos de clima temperado a matéria orgânica causava uma diminuição da reflectância e uma absorção da energia entre 400 e 1.300 nm. COURAULT e GIRARD (1988), HENDERSON et al. (1992) e MADEIRA NETTO et al. (1993) verificaram que tal diminuição abrangia todo o espectro óptico, como aqui observado. Portanto, sua remoção causa um aumento significativo de reflectância dos solos. Nos solos mais argilosos, como o LR e a TR, a matéria orgânica tende a reagir com a fração argila formando compostos argilo-húmicos mais estáveis. Nos solos mais arenosos, como o PV e a AQ, a matéria orgânica protege as frações mais grosseiras, porém com pouca estabilidade.

A fração areia, principalmente dos solos de textura média a mais grosseira, apresenta o quartzo como o principal componente mineralógico, como verificado nas análises de raios-X (Figura 2e).

Quadro 1. Valores médios das propriedades físicas e químicas dos solos, para as profundidades de 0-20 cm (A) e 40-60 cm (B)

Profundidade	pH CaCl ₂	CTC ⁽¹⁾ mmol _c dm ⁻³	V ⁽²⁾ %	m ⁽³⁾	Análise granulométrica		
					Areia	Silte	Argila
Latossolo Vermelho Eutroférico (LR)							
A	5,0	77,6	62,0	4,3	263,0	113,0	623,3
B	4,2	61,3	29,3	34,0	230,0	123,0	646,0
Nitossolo Vermelho (TR)							
A	5,0	107,0	55,3	1,6	206,0	180,0	641,6
B	5,0	88,6	59,0	0,8	121,6	148,3	730,0
Argissolo Vermelho (PE)							
A	5,1	76,0	67,2	4,8	634,0	100,0	266,0
B	4,4	105,2	40,6	24,6	554,0	86,0	360,0
Argissolo Vermelho Amarelo (PV)							
A	4,9	43,1	61,5	3,6	793,0	60,0	147,0
B	4,4	37,0	40,5	37,8	738,0	65,0	197,0
Latossolo Vermelho (LE1)							
A	4,8	91,0	45,6	4,7	396,0	116,0	486,0
B	4,3	77,0	23,3	36,0	326,0	116,0	556,0
Latossolo Vermelho (LE2)							
A	5,0	98,8	52,0	9,7	703,3	61,7	235,0
B	4,2	53,5	30,2	49,8	643,3	68,3	288,3
Latossolo Vermelho (LE3)							
A	4,9	52,0	47,2	11,2	780,0	52,0	168,0
B	4,2	42,6	25,0	47,8	768,0	52,0	180,0
Neossolo Quartzarênico (AQ)							
A	5,0	38,2	55,7	2,8	846,7	53,0	99,0
B	4,2	32,5	27,2	63,3	838,0	62,0	100,0

(¹) CTC = capacidade de troca de cátions; (²) V = (Soma de bases/CTC) * 100; (³) m = (Alumínio (Soma de bases+Alumínio))*100.

Como a reflectância do quartzo é elevada (WHITE et al., 1997) e a da matéria orgânica é baixa, a remoção da matéria orgânica expõe mais o quartzo e, assim, há aumento da intensidade de reflectância do solo. Embora se esperasse que o incremento da reflectância com a remoção da matéria orgânica fosse mais sensível nos solos arenosos, observou-se que para todos os solos, exceto para LR e PV, houve diferença entre esses dois tratamentos pelo menos em alguma banda analisada (Quadro 3).

Para a AQ houve diferença significativa (Quadro 4) ao longo de quase todo o espectro analisado. Nos solos mais argilosos e com maior teor de ferro, como no LR, a diminuição no teor de matéria orgânica

devida ao tratamento (AMO) foi, em termos absolutos, superior à diminuição no teor de matéria orgânica da AQ, mas, mesmo assim, esse efeito foi mais pronunciado nos solos arenosos.

No caso do LR, a proximidade estatística entre os dois tratamentos deve-se ao fato de que, embora tenha havido a remoção da matéria orgânica, outros componentes ainda permanecem contribuindo para manter uma baixa reflectância, particularmente os minerais de ferro (MATHEWS et al., 1973; STONER et al., 1980). Entre esses destacam-se a magnetita e a ilmenita, minerais pesados, abundantes em solos originados de eruptivas básicas e detectados nas análises de raios-X da fração mais grosseira (Figura 2e).

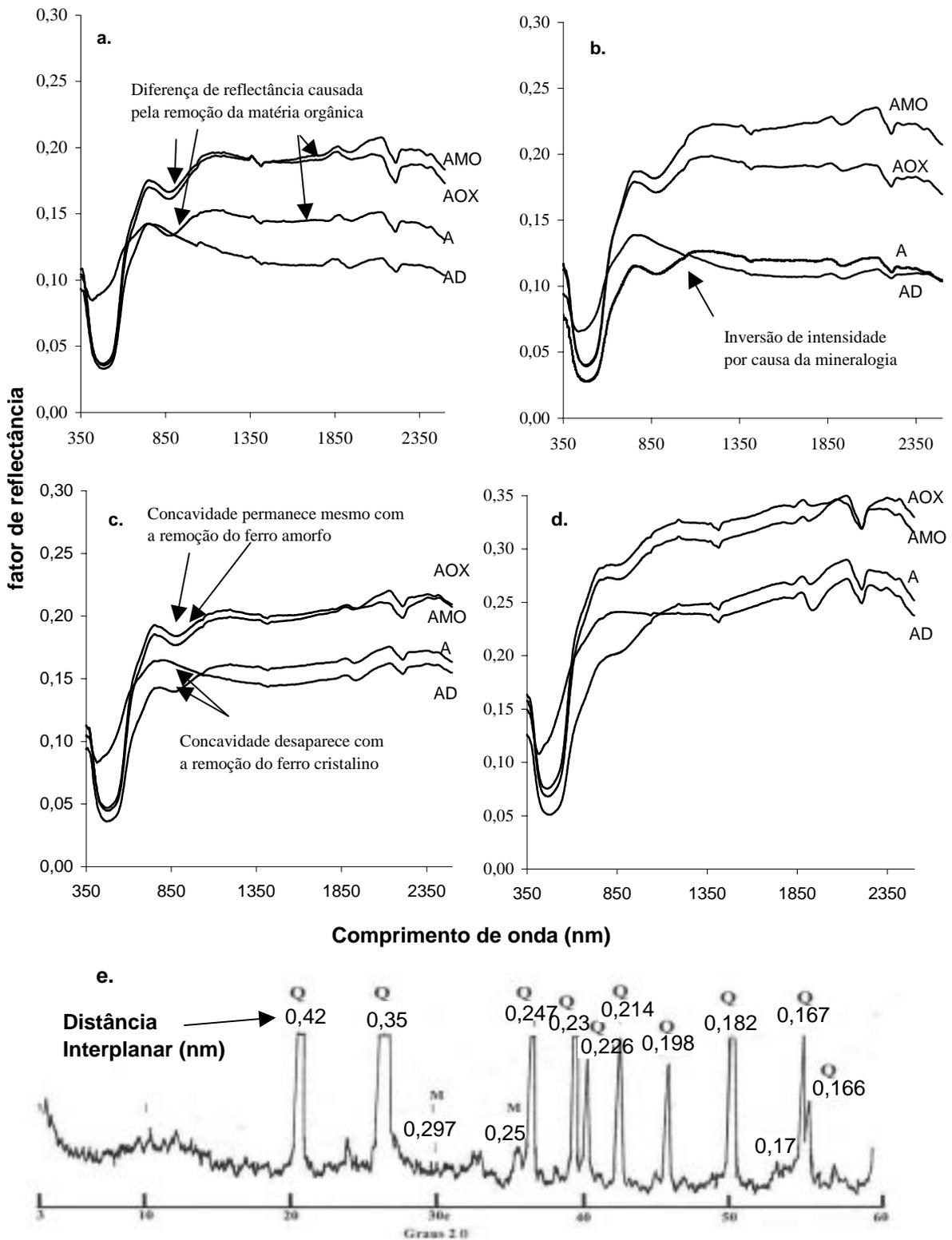


Figura 2. Curvas espectrais dos tratamentos: testemunha (A), remoção: da matéria orgânica (AMO); do ferro cristalino e amorfo (AD); do ferro amorfo (AOX) do (a) LR; (b)TR; (c) PE; (d) PV e (e) Difratoograma de raios-X da fração silte, amostra desferri-ficada do solo LR (hor. A; Q, quartzo e M, magnetita).

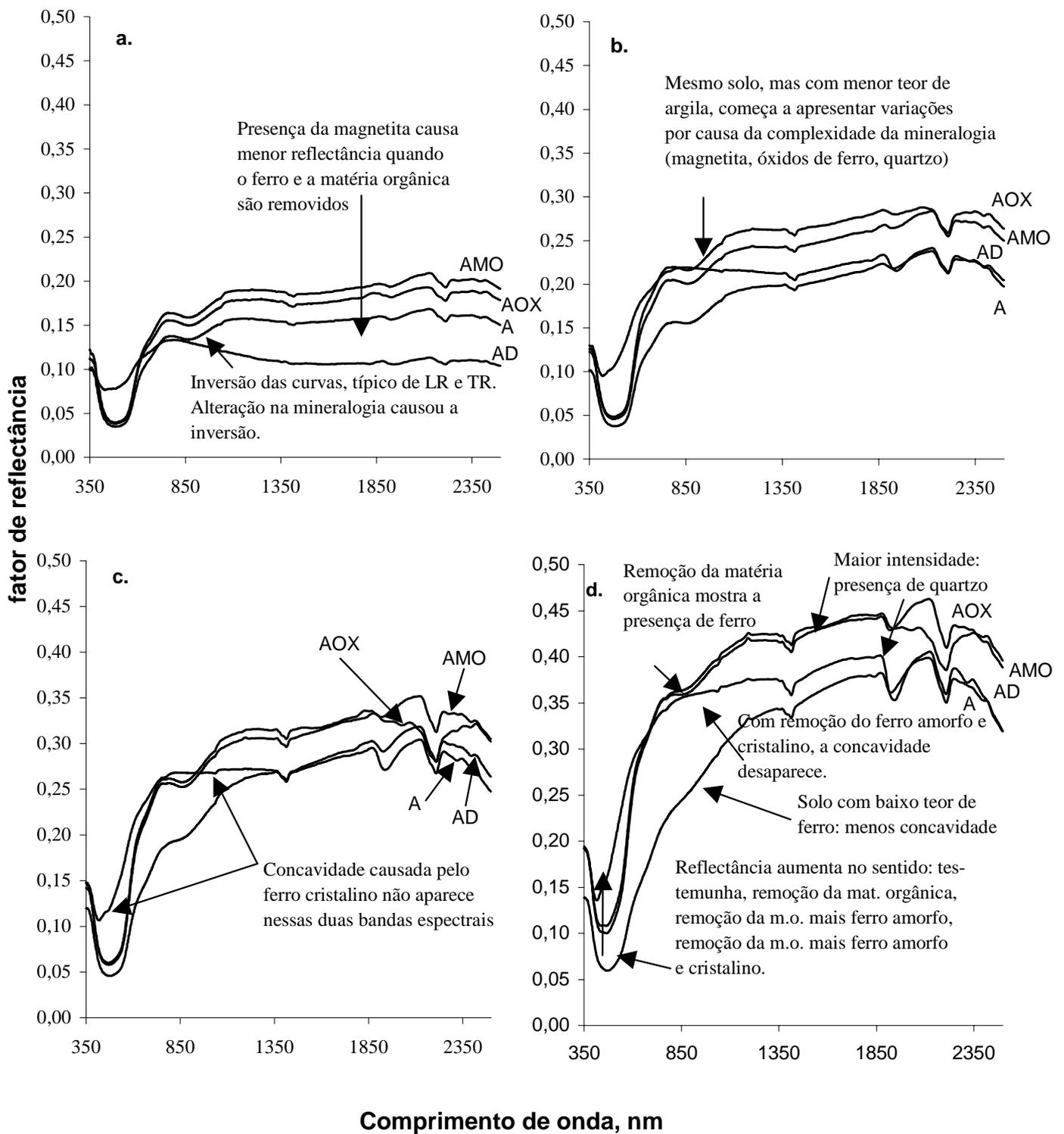


Figura 3. Curvas espectrais do tratamento (A), e dos tratamentos com remoção da: matéria orgânica (AMO); do ferro cristalino e amorfo (AD); do ferro amorfo (AOX) do (a) LE; (b) LE2; (c) LE3 e (d) AQ.

Quadro 2. Valores médios de matéria orgânica e ferro, para as profundidades de 0-20 cm, segundo os tratamentos aplicados para os solos estudados

Tratamento ⁽²⁾	Atributos ⁽³⁾				Tratamento	Atributos			
	M.O.	Fe ₂ O ₃	Fe(d)	Fe(ox)		M.O.	Fe ₂ O ₃	Fe(d)	Fe(ox)
	g kg ⁻¹					g kg ⁻¹			
LR	22,3	207,1	143,0	47,0	LE1	21,3	127,0	79,0	47,0
LRMO	1,5	205,8	140,0	43,0	LE1MO	3,3	122,0	13,9	40,0
LRD	2,2	71,9	5,5	0,0	LE1D	4,4	46,5	2,9	0,0
LROX	2,1	202,3	16,9	12,3	LE1OX	3,2	106,2	12,6	0,0
TR	27,0	215,0	151,0	68,0	LE2	16,5	58,0	46,0	22,0
TRMO	1,7	210,0	145,0	63,0	LE2MO	1,0	53,6	11,5	20,0
TRD	1,9	141,2	9,1	0,0	LE2D	1,8	33,6	3,8	0,0
TROX	2,0	200,0	13,5	0,0	LE2OX	1,1	45,0	9,9	0,8
PV	16,8	86,2	75,0	31,0	LE3	16,4	38,0	32,0	11,0
PVMO	0,7	86,0	2,8	30,0	LE3MO	0,7	35,0	4,4	10,0
PVD	1,1	19,2	1,4	0,0	LE3D	0,8	11,9	1,9	0,0
PVOX	0,7	23,5	2,5	0,0	LE3OX	0,9	20,0	4,3	0,0
PE	12,1	92,0	25,0	9,0	AQ	11,0	11,0	10,0	3,0
PEMO	0,9	91,6	23,0	8,0	AQMO	0,7	10,0	2,2	2,7
PED	1,5	37,2	3,9	0,0	AQD	1,0	7,0	1,2	9,4
PEOX	1,6	20,0	9,7	0,0	AQOX	0,7	9,6	1,7	0,0

(¹) Solos: Nitossolo Vermelho (TR); Latossolo Vermelho Eutroférico (LR); Argissolo Vermelho (PE); Latossolo Vermelho, com argila no B superior a 350 g kg⁻¹ (LE1); com argila no horizonte B entre 220 e 350 g kg⁻¹ (LE2), e com teor de argila entre 150 e 220 g kg⁻¹ (LE3); Neossolo Quartzarênico (AQ) e Argissolo Vermelho Amarelo (PV).

(²) Sigla do solo: testemunha; MO: remoção da matéria orgânica; D: remoção da matéria orgânica e do ferro cristalino e amorfo; OX: remoção da matéria orgânica e do ferro amorfo.

(³) M.O.: matéria orgânica; Fe₂O₃, ferro total extraído por ataque sulfúrico; Fe(d): ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Fe(ox): ferro extraído por oxalato de amônio.

Quadro 3. Análise estatística dos resultados de reflectância de cada banda, para verificar a discriminação das curvas espectrais obtidas nas figuras indicadas

Tratamento ⁽¹⁾	Bandas TM/Landsat ⁽²⁾ (nm)											
	1		2		3		4		5		7	
	450-520		520-600		630-690		760-900		1550-1750		2080-2350	
Latossolo Vermelho Eutroférico (LR) => Figura 2 a												
Testemunha	0,033	A ⁽³⁾	0,055	A	0,119	A	0,136	A	0,144	AB	0,144	AB
AMO	0,036	A	0,061	AB	0,14	A	0,164	A	0,192	B	0,199	B
AOX	0,037	A	0,066	B	0,147	A	0,169	A	0,189	B	0,185	B
AD	0,091	A	0,108	C	0,132	A	0,138	A	0,111	AB	0,111	A
Nitossolo Vermelho (TR) => Figura 2 b												
Testemunha	0,035	A	0,055	A	0,114	A	0,136	A	0,147	A	0,142	A
AMO	0,040	A	0,068	B	0,151	B	0,184	B	0,221	B	0,225	B
AOX	0,041	A	0,071	BC	0,150	B	0,174	B	0,190	B	0,183	C
AD	0,069	B	0,090	C	0,124	A	0,135	A	0,107	C	0,109	A
Argissolo Vermelho (PE) => Figura 2 c												
Testemunha	0,037	A	0,059	A	0,117	A	0,141	A	0,161	AC	0,171	AB
AMO	0,046	B	0,075	B	0,156	B	0,180	B	0,199	BC	0,215	B
AOX	0,048	B	0,081	B	0,165	B	0,187	B	0,202	B	0,207	B
AD	0,093	C	0,119	C	0,150	B	0,163	AB	0,147	A	0,159	A
Argissolo Vermelho Amarelo (PV) => Figura 2 d												
Testemunha	0,171	A	0,082	A	0,155	A	0,200	A	0,269	A	0,278	A
AMO	0,215	AB	0,119	AB	0,229	AB	0,272	A	0,319	A	0,337	A
AOX	0,207	CB	0,132	B	0,242	B	0,285	A	0,334	A	0,337	A
AD	0,159	C	0,169	B	0,169	B	0,239	A	0,248	A	0,263	A

(¹) Três repetições por tratamento (amostras de 0 a 20 cm de profundidade); AMO: remoção de matéria orgânica; AOX: remoção de matéria orgânica e ferro na forma amorfa; AD: remoção de matéria orgânica, ferro-amorfo e cristalino; (²) Bandas selecionadas; (³) Letras iguais na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey) ao nível de 5%.

A fim de explicitar melhor o papel da matéria orgânica na diminuição da reflectância em diferentes regiões do espectro, a análise estatística de diferença de médias é apresentada nos quadros 3 e 4.

Observa-se que há uma variabilidade de poder de discriminação entre as bandas, sendo as referentes ao verde (520-600 nm), ao vermelho (630-690 nm) e ao infravermelho médio (1.550 nm-1.750 nm) as mais sensíveis às diferenças do tratamento de remoção da matéria orgânica (AMO).

Quanto aos tipos de solos, a TR, o PE, o LE3 e a AQ foram os que tiveram maior número de bandas sensíveis ao tratamento de remoção da matéria orgânica.

Outro aspecto importante na análise espectral é a presença de feições de absorção ao longo das curvas espectrais. Na feição ao redor de 850 nm (Figura 2) ocorreu um realce que pode ser explicado pela remoção da matéria orgânica, permitindo que a concavidade causada pelos óxidos de ferro nessa faixa ficasse mais evidente, particularmente para os solos AQ e LE3, mesmo considerando que esses solos têm baixos teores de óxidos de ferro. Dessa forma, pode-se afirmar que a matéria orgânica, por ter baixo nível de reflectância e praticamente não apresentar feições espectrais de absorção, quando presente em mistura com material de maior reflectância, diminui a reflectância e, conseqüentemente, reduz o contraste das feições de absorção do material.

Quadro 4. Análise estatística dos resultados de reflectância de cada banda, para verificar a discriminação das curvas espectrais obtidas nas figuras indicadas

Tratamento ⁽¹⁾	Bandas TM/Landsat ⁽²⁾ (nm)											
	1		2		3		4		5		7	
	450-520		520-600		630-690		760-900		1550-1750		2080-2350	
Latossolo Vermelho (LE1) => Figura 3 a												
Testemunha	0,035	A ⁽³⁾	0,054	A	0,155	A	0,135	AB	0,155	A	0,161	A
AMO	0,040	A	0,063	A	0,229	AB	0,161	A	0,189	B	0,201	B
AOX	0,039	A	0,062	A	0,242	B	0,152	AB	0,177	AB	0,187	AB
AD	0,078	B	0,093	B	0,211	AB	0,131	B	0,106	C	0,109	C
Latossolo Vermelho (LE2) => Figura 3 b												
Testemunha	0,038	A	0,061	A	0,125	A	0,156	A	0,209	A	0,227	A
AMO	0,047	A	0,079	AB	0,168	B	0,202	B	0,253	A	0,271	A
AOX	0,049	A	0,086	B	0,182	B	0,217	B	0,271	A	0,277	A
AD	0,109	B	0,149	C	0,192	B	0,218	B	0,221	A	0,229	A
Latossolo Vermelho (LE3) => Figura 3 c												
Testemunha	0,047	A	0,075	A	0,145	A	0,194	A	0,286	A	0,300	A
AMO	0,060	A	0,105	B	0,214	B	0,254	B	0,318	A	0,334	A
AOX	0,062	A	0,109	B	0,219	B	0,259	B	0,322	A	0,305	A
AD	0,126	B	0,178	C	0,235	B	0,267	B	0,282	A	0,287	A
Neossolo Quartzarênico (AQ) => Figura 3 d												
Testemunha	0,062	A	0,096	A	0,165	A	0,239	A	0,371	A	0,375	A
AMO	0,107	B	0,179	B	0,303	B	0,358	B	0,435	A	0,436	A
AOX	0,116	B	0,190	B	0,307	B	0,362	B	0,438	A	0,412	A
AD	0,177	C	0,253	C	0,311	B	0,352	B	0,393	A	0,383	A

(¹) Três repetições por tratamento (amostras de 0 a 20 cm de profundidade); AMO: remoção de matéria orgânica; AOX: remoção de matéria orgânica e ferro na forma amorfa; AD: remoção de matéria orgânica, ferro-amorfo e cristalino; (²) Bandas selecionadas; (³) Letras iguais na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey) ao nível de 5 %.

Poderia ser esperado que os constituintes da fração orgânica estivessem interferindo neste processo de análise espectral, como observado por HENDERSON et al. (1992), para quem os ácidos fúlvicos refletem mais que os húmicos. No presente caso, entretanto, tais elementos encontram-se com teores semelhantes (Quadro 5), e, assim, apresentaram influência indistinta. Os mesmos efeitos ocorreram nas amostras de subsuperfície.

3.3 Óxidos de ferro e reflectância

O tratamento para remoção da forma amorfa de ferro, juntamente com a matéria orgânica (tratamento AOX), promoveu aumento da reflectância em

praticamente todo o espectro analisado para todos os solos (Figuras 2 e 3). Tomando como exemplo o LR, o teor de ferro amorfo na testemunha foi de 47,0 g.kg⁻¹ e sua remoção resultou em diminuir o teor para a faixa de 12,3 g.kg⁻¹, fazendo com que a intensidade de reflectância aumentasse (Quadro 2, Figura 2a). Por outro lado, o teor de ferro total praticamente não se alterou e, mesmo assim, ocorreu diferença de reflectância.

Verificaram-se as maiores diferenças entre os dois tratamentos, testemunha e remoção de ferro amorfo com oxalato, ocorreram a partir de 550 nm, faixa de aumento de reflectância da goethita e da hematita, em que ocorreram algumas feições de absorção na forma de concavidades nas curvas espectrais (Figuras 2 e 3).

A partir de 1.100 nm, a reflectância desses dois componentes foi elevada e praticamente sem bandas de absorção (ROUSH et al., 1993; WHITE et al., 1997).

As bandas mais sensíveis à diferença entre esses dois tratamentos (A e AOX) foram as do verde e do vermelho (Quadros 3 e 4), regiões de baixa a média reflectância de goethita e hematita. Embora tenha havido aumento da reflectância com a retirada do ferro amorfo, a forma das curvas pouco se alterou, revelando que a presença dessa forma de ferro relaciona-se mais com o albedo do solo do que com a forma da curva. Esse fato fica claro quando se observa a feição de absorção em 850 nm, a qual se mantém inalterada, mudando apenas de magnitude.

Como o tratamento de remoção do ferro amorfo mostrou que as formas das curvas causadas pelo ferro não se alteravam, o que podem ser atribuído ao ferro cristalino.

As curvas do tratamento seguinte, em que, além da remoção da matéria orgânica, foram também removidos o ferro amorfo e o cristalino (tratamento AD), resultaram em um aumento da intensidade de reflectância, principalmente entre 400 nm e 600-700 nm, nos solos estudados (Figuras 2 e 3).

Nos solos arenosos, LE3, PV e AQ, o aumento da reflectância foi maior e avançou mais no espectro, até 1.200 nm. Com a remoção desses componentes, o quartzo, com sua alta refletividade, ficou mais expresso. Outro aspecto a ser destacado consiste em que a remoção do ferro cristalino levou ao desaparecimento

das concavidades em 400-500 nm e em 800-900 nm, comprovando sua influência nessas partes do espectro (DEMATTÊ e GARCIA, 1999).

A remoção do ferro cristalino e amorfo (tratamento AD) causou diferença significativa de reflectância em relação à testemunha para quase todos os solos nas bandas 1 ou 2 (Quadros 3 e 4), referentes à região de absorção por ferro. Essas observações explicam porque DEMATTÊ et al. (1999) verificaram que nos Vertissolos da região de Piracicaba (SP), com altos teores de ferro total (na faixa de 200 g.kg⁻¹), não apresentavam concavidade nessa faixa do espectro óptico, justamente porque a maior parte desse ferro estava na forma amorfa. Em termos estatísticos, esse tratamento foi o que mais se diferenciou da testemunha, particularmente nas bandas de menores comprimentos de onda (TM 1 e TM2).

A extração com ditionito-citrato-bicarbonato (tratamento AD), embora tenha resultado em aumento da reflectância na região do visível, causou redução da intensidade de reflectância em relação à testemunha, exceto para a AQ, na região acima de 1.000 nm (Figuras 2 e 3). Esse efeito foi particularmente forte para os solos argilosos com maior teor de ferro (LR, TR e LE1). Resultados semelhantes foram observados por MADEIRA NETTO (1996), ou seja, para solos com baixos teores de ferro houve aumento da reflectância em quase todo o espectro eletromagnético, enquanto para solos ricos em óxidos de ferro, a remoção de matéria orgânica aumentou a reflectância até próximo a 600 nm e diminuiu no restante do espectro.

Quadro 5. Fracionamento químico da matéria orgânica dos solos estudados (horizonte A)⁽¹⁾

Solo	C de Ác. Húmico ⁽²⁾	C de Ác. Fúlvico ⁽³⁾		C total ⁽⁴⁾
		g kg ⁻¹		
Latossolo Vermelho Eutroférico (LR)	1,98 A ⁽⁵⁾	1,84 A		8,5 A
Nitossolo Vermelho (TR)	1,47 A	1,75 A		7,6 A
Argissolo Vermelho (PE)	1,47 A	1,64 A		8,3 A
Latossolo Vermelho (LE1)	1,67 A	1,89 A		6,5 A
Latossolo Vermelho (LE2)	1,69 A	1,67 A		6,3 A
Latossolo Vermelho(LE3)	1,52 A	2,13 A		6,8 A
Argissolo Vermelho-Amarelo (PV)	1,3 A	1,54 A		8,9 A
Neossolo Quartzarênico (AQ)	1,02 A	1,95 A		5,1 A

⁽¹⁾ Resultados médios de três repetições (amostras de 0 a 20 cm de profundidade); ⁽²⁾ Ácido húmico total extraído pelo Na₄P₂O₇ 0,1N e NaOH 0,1N; ⁽³⁾ Ácido fúlvico total extraído pela Na₄P₂O₇ 0,1N e NaOH 0,1N; ⁽⁴⁾ Carbono orgânico; ⁽⁵⁾ Teste de Tukey: mesma letra na coluna indica não haver diferença significativa ao nível de 5%.

Nesses casos, a extração do ferro cristalino promoveu uma remoção da hematita e da goethita. Na parte acima de 1.000 nm, porém, tal remoção expôs outros elementos, como a magnetita, que tem albedo muito baixo (GAFFEY et al., 1993); de fato, o ditionito-citrato-bicarbonato não remove a magnetita, que permanece no sistema.

Os solos mais arenosos (com exceção do PV) não apresentaram queda tão pronunciada da reflectância, pois possuíam teores mais baixos de óxidos a serem removidos, e mais quartzo para manter a reflectância em patamares similares à testemunha. Os mesmos efeitos ocorreram nas amostras de subsuperfície.

4. CONCLUSÕES

1. A remoção da matéria orgânica promoveu aumento da reflectância em todo o espectro analisado, para todos os solos.

2. A remoção conjunta da matéria orgânica e do ferro amorfo causou aumento geral da reflectância para todos os solos, mas sem modificar o formato das curvas espectrais. Assim, o ferro amorfo não condiciona a formação da concavidade centrada em 850 nm.

3. A remoção do ferro cristalino provocou aumento da reflectância na região do visível, mas não nas regiões do infravermelho próximo e médio. Para os solos argilosos, causou diminuição da reflectância após 1.200 nm, provavelmente devido a um realce da expressão espectral da magnetita que permaneceu no sistema. O ferro cristalino mostrou-se responsável pelas concavidades formada em 400 nm e em 850 nm.

4. O uso de espectrorradiometria de laboratório mostrou-se uma técnica rápida, não destrutiva, e pouco exigente em preparo para analisar feições de absorção por ferro e efeitos de matéria orgânica em solos. As formas de ferro têm maior importância na avaliação das feições de absorção do que o conteúdo de ferro total.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece ao INPE (Instituto de Pesquisas Espaciais), Departamento de Sensoriamento Remoto, pela oportunidade de trabalhar conjuntamente no desenvolvimento da Tese de Livre Docência.

Os autores agradecem à FAPESP pelo financiamento do projeto (Proc. n. 95/6259-6, 95/9641-9), de responsabilidade de primeiro autor, e ao CNPq pelas respectivas bolsas de pesquisadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEN-DOR, E.; IRONS, J.R.; EPEMA, G.F. Soil reflectance. In: RENCZ, A.N. *Remote sensing for the earth sciences*. John Wiley, New York, 1998. p.111-188.

BOWERS, S.A.; HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. *Soil Science*, Baltimore, v.100, n.2, p.130-138, 1965.

CAMARGO, A.O. DE; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC*. Campinas: IAC. 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

COURAULT, D.; GIRARD, M.C. Relationships between the soil composition and their spectral signature. In: SYMPOSIUM OF THE WORKING GROUP REMOTE SENSING, 5., Budapest, 1988, Budapest. *Proceedings...* Budapest, Hungary, April, 1988. p.178-185.

DABIN, B. Étude d'une méthode d'extraction de la matière humique du sol. *Science du Sol*, Oxford, v.1, p.47-63, 1971.

DEMATTÊ, J.A.M.; CAMPOS, R.C.; ALVES, M.C. Evaluation of soil survey by spectral reflectance. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED GEOLOGIC REMOTE SENSING, 13., 1999, Vancouver, British Columbia, Canada. *Proceedings...* Ann Arbor, MI: Erim, 1999., v.2, p.126-133.

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*, Madison, v.63, n.2, p. 327-342, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Serviço de Produção de Informação, 1999. 412 p.

EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. *Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo*. São José dos Campos: INPE, 1992. 131p. (INPE-5424-PRP-172)

GAFFEY, S.J.; MCFADDEN, L.A.; NASH, D.; PIETERS, C.M. Ultraviolet, visible, and near-infrared reflectance spectroscopy: laboratory spectra of geologic materials. In: PIETERS, C.M.; ENGLERT, P.A.J. *Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition*. Cambridge, Cambridge University, 1993. p.43-77.

GEOPHYSICAL ENVIRONMENTAL RESEARCH CORP., (GER). *Mark V Dual Field of View IRIS Manual*. Version 1.3. Milbrook, New York: Milbrook, 1996. , 63 p.

- HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANSMEIER, D. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.56, p. 865-72, 1992.
- HOLMGREN, G.S. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.31, p.210-221, 1967.
- HUETE, A.R. Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations. *Photo Interpretation*, Paris, v.34, n.2, p.101-114, 1996.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. (IPT). Divisão de Minas e Geologia Aplicada. *Mapa geológico do Estado de São Paulo*. São Paulo, 1981. Escala 1:1000.000.
- JACKSON, M.L. *Soil chemical analysis: advanced course*. Madison: Wisconsin University, 1969. 895p.
- KING, M.D.; GREENSTONE, R. *1999 EOS reference handbook*. NASA, Washington, NASA, 1999. 361p.
- LABSPHERE REFLECTANCE CALIBRATION LABORATORY. *Spectral reflectance target calibrated from 0.25-2.5 mm reported in 0.050 mm intervals*. Sutton, 1996. 5p.
- LEMOES, R.C.; SANTOS, R.D. *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. 84p.
- LYMBURNER, L.; BEGGS, P.J.; JACOBSON, C.R. Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, MD, v.66, n.2, p.183-191, 2000.
- MACKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite anal oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various class of soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Saskatchewan, v.46, p.13-22, 1966.
- MADEIRA NETTO, J.S.; POUGET, M.; BEDIDI, A.; CERVELLE, B. Informações quantitativas sobre a mineralogia dos latossolos a partir da reflectância espectral no visível e infravermelho próximo e médio (400 a 2500 nm). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 1993. v.3, p.249-255.
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. *Photo Interpretation*, Paris, v.34, p. 59-70, 1996.
- MATHEWS, H.L.; CUNNINGHAM, R.L.; PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.37, p.421-424, 1973.
- MELFI, A.J.; PEDRO, G.; VOLKOFF, B. Natureza e distribuição dos compostos ferríferos nos solos do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.3, p. 47-54, 1979.
- NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINSBERG, I.W.; LIMPERIS, T. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington, U.S. Department of Commerce, 1977. 52p. (NBS Monograph, 160).
- OBUKHOV, A.I.; ORLOV, O.S. Spectral reflectance of major soil groups and possibility of using diffuse reflections in soil investigations. *Soviet Soil Science*, New York, v.1, p. 174-84, 1964.
- RAIJ, B. van.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, C.O. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- ROUSH, T.L.; BLANEY, D.L.; SINGER, R.B. The surface composition of Mars as inferred from spectroscopic observations. In: PIETERS, C.M.; ENGLERT, P.A.J. *Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition*. Cambridge, Cambridge University, 1993. p.367-393.
- SHIMABUKURO, Y.E.; NOVO, E.M.; PONZONI, F.J. Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, vv.33, p.1729-1737, 1998.
- SOIL SURVEY STAFF. *Keys to Soil Taxonomy*. 8th edition., SMSS technical monograph No. 6. Blacksburg, Virginia, 1998. 422p. (SMSS technical monograph No., 6)
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *SAS/STAT: user's guide: version 6.4.ed. v. 1*. Cary: SAS, 1989a, 943 p. 1989a.
- STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. *SAS/STAT: user's guide: version 6.4.ed. v. 2*. Cary: SAS, 846p. 1989b, 846p.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.F.; WEISMILLER, R.A.; BIEHL, L.L.; ROBINSON, B.F. Extension of laboratory-measured soil spectra to field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.572-574, 1980.
- SUMNER, M.E. *Handbook of soil science*. Washington, D.C.: CRC Press, 1999. p.
- VALERIANO, M.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.; OLIVEIRA, J.B. Bidirectional reflectance of tropical soils. *International Journal of Remote Sensing*, London, v.16, n.1, p.113 - 128, 1995.
- WHITE, K.; WALDEN, J.; DRAKE, N.; ECKARDT, F.; SETTLE, J. Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper Data. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.62, p.30-39, 1997.
- YANG, J.; PRINCE, S.D. A theoretical assessment of the relation between woody canopy cover and red reflectance. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.59, p.428-439, 1997.