

VARIAÇÕES INDUZIDAS DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E SUA INFLUÊNCIA NA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL DE TRÊS SOLOS DO ESTADO DO PARANÁ⁽¹⁾

J. A. M. DEMATTÊ⁽²⁾, G. J. GARCIA⁽³⁾ & L. I. PROCHNOW⁽²⁾

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar a influência de alterações induzidas em alguns atributos químicos da caulinita e dos solos Latossolo Roxo, Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada, encontrados no Estado do Paraná, sobre a sua reflectância espectral. Foram realizados tratamentos para saturação das amostras dos solos e mineral de argila, com soluções de acetado de cálcio e acetato de sódio, bem como incubações com carbonato de cálcio e com bicarbonato de sódio. Dados espectrométricos das amostras de argila e de solos foram obtidos na faixa espectral entre 400 e 2.500 nm em laboratório. Os tratamentos com acetado de cálcio e com acetato de sódio, nas amostras dos três solos e nas amostras do mineral de argila caulinita, promoveram aumentos no teor de cálcio e de sódio em relação à testemunha, resultando numa maior reflectância. As incubações com carbonato de cálcio ou bicarbonato de sódio nas amostras de solos da camada de 40 a 60 cm promoveram aumentos nos teores de cálcio, sódio e CTC efetiva, decréscimo de matéria orgânica e precipitação de alumínio. Essas alterações contribuíram, conjuntamente, para um aumento na magnitude da reflectância em todo o espectro eletromagnético. Apesar disso, as feições espectrais de absorção dos solos não se alteraram. As análises estatísticas mostraram o nível de discriminância entre as curvas espectrais dos solos.

Termos de indexação: sensoriamento remoto, espectrorradiometria, química do solo.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado, apresentada pelo primeiro autor à ESALQ/USP, Piracicaba (SP), em 6 de abril de 1995, trabalho apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, em Salvador (BA), 14 a 19 de abril de 1996. Recebido para publicação em julho de 1996 e aprovado em junho de 1998.

⁽²⁾ Professor Doutor do Departamento de Ciência do Solo, USP/ESALQ, Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jamdemat@carpa.ciagri.usp.br.

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Cartografia, UNESP, Caixa Postal 178, CEP 13506-700 Rio Claro (SP).

SUMMARY: *INFLUENCE OF INDUCED CHEMICAL PROPERTIES OF THREE SOILS FROM PARANÁ STATE ON THE SPECTRAL REFLECTANCE*

This study was conducted in order to verify the influence of induced chemical properties in standard kaolinite and samples of three soils from the State of Paraná, Brazil - Hapludox Haplohumox and Tropohumults - on the spectral reflectance obtained in laboratory using a spectroradiometer, adjusted from 400 to 2500 nm. The samples were treated with solutions of calcium acetate, sodium acetate and incubated with calcium carbonate and sodium bicarbonate. Higher spectral reflectance was observed in the samples treated with calcium and sodium acetate induced by the higher concentrations of both ions. The incubation with calcium carbonate and sodium bicarbonate in the soil samples from the 40 to 60 cm layer promoted higher concentrations of calcium, sodium and effective CEC, lower amounts of organic matter and aluminum precipitation. These alterations contributed to higher reflectance along the wavelength range analyzed. Although changes were observed in the intensity of reflectance, the absorption features obtained in each case were the same. Statistical analysis showed the discrimination level of the spectral curves of soils and standard kaolinite.

Index terms: remote sensing, espectralradiometry, soil chemistry.

INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto pode ser utilizado como uma técnica auxiliar no estudo de solos. Trabalhos vêm sendo realizados para entender as relações entre os atributos dos solos e sua energia refletida, que nada mais é do que a expressão das diferentes características dos solos.

O comportamento espectral dos solos varia de acordo com diversos fatores intrínsecos a eles. Os atributos que mais influenciam a energia refletida são: conteúdo e tipo de matéria orgânica e óxidos de ferro, minerais argilosos, umidade (Bowers & Hanks, 1965; Baumgardner et al., 1970; Al-Abbas et al., 1972; Mathews et al., 1973; Sherman & Waite, 1985; Coleman & Montgomery, 1987).

Poucos trabalhos foram realizados no sentido de entender as relações solo-reflectância em solos brasileiros. Epiphânio et al. (1992) caracterizaram vários solos do estado de São Paulo. Madeira Netto et al. (1993) estudaram as bandas de absorção da gibbsita de solos dos cerrados. As alterações químicas de um solo, principalmente as relacionadas com a parte trocável, e sua influência na reflectância, entretanto, foram pouco exploradas até o momento.

Montgomery (1976) observou que a capacidade de troca catiônica pode provocar alterações na reflectância dos solos. Além disso, outros fatores indicadores das condições químicas do solo, como os teores de cálcio e potássio, contribuíram para alteração da energia refletida, conforme relatado por Schreier (1977). Boluda et al. (1993) concluíram que solos com maiores teores de carbonato de cálcio apresentaram maior intensidade de reflectância.

Os solos brasileiros são, em sua maioria, pobres e dessaturados, como, por exemplo, os Latossolos. Como consequência, são comumente manejados quimicamente, com o intuito de melhorar sua fertilidade. Esse manejo altera, entre outros, a CTC efetiva, os teores de alumínio e as bases trocáveis (Raij, 1991).

Neste contexto, através da utilização de um espectrorradiômetro na faixa entre 400 e 2.500 nm, em laboratório, o presente trabalho teve os seguintes objetivos: (a) estudar as variações no comportamento espectral de amostras de Latossolos Roxos (originadas de rochas eruptivas básicas) e de Latossolos Brunos e de Terras Brunas Estruturadas, desenvolvidas em rochas eruptivas ácidas do estado do Paraná (Brasil) em função das alterações provocadas pela adição de produtos químicos nas amostras dos solos; (b) verificar a influência do acetato de sódio e do acetato de cálcio na reflectância dos solos estudados e do mineral de argila-padrão caulinita.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de estudo e coleta de amostras de solo

Foram coletadas amostras de duas regiões do estado do Paraná. Uma delas representada por um solo original de rocha ígnea básica (Latossolo Roxo - LR), e a outra por solos originados de rochas ácidas (riolito) (Latossolo Bruno - LB; Terra Bruna Estruturada - TB). O principal município da área de ocorrência do LR é Formosa D'Oeste e do LB e da TB, Guarapuava, ambos localizados no planalto de

Guarapuava (PR). Do ponto de vista geológico, os solos estudados desenvolveram-se da Formação Serra Geral do Grupo São Bento (EMBRAPA, 1984).

Foram coletadas amostras, uma para cada solo, nas profundidades 0 a 20 e 40 a 60 cm, em quantidades suficientes para a realização de tratamentos químicos em subamostras. Coletou-se a amostra em subsuperfície devido ao menor teor de matéria orgânica. Essas amostras foram secas em estufas a 45°C, por 24 horas, com subsequente destorroamento e passadas por peneiras de 2 mm, para posteriores análises e tratamentos. Foi obtido padrão puro de argila caulinita originada de Baths, Carolina do Sul, EUA, que sofreu os mesmos processos de preparo dos solos. Foi escolhida a caulinita por ser um mineral presente nos três solos.

Análise física, química e mineralógica dos solos

Nas análises químicas dos solos, foram determinados: pH (CaCl₂), matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio (Raij & Quaggio, 1983). Na análise granulométrica, foram determinadas areia grossa e areia fina, silte e argila. A sílica, a alumina e o ferro total foram determinados pelo ataque sulfúrico (Camargo et al., 1986).

Tratamento químico da argila-padrão

Uma amostra de argila-padrão caulinita sofreu os seguintes tratamentos, baseados em Chapman & Pratt (1961): (a) caulinita agitada com água (testemunha): a amostra foi colocada em erlenmeyer de vidro de 200 mL, adicionou-se água desmineralizada por 24 horas. Posteriormente, os tubos foram centrifugados, a água sobrenadante removida e a argila posta a secar a 45°C; (b) caulinita saturada com cálcio: para o nível máximo de saturação, usaram-se 100 mL de solução de acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ e 100 mL de solução de acetato de cálcio 0,01 mol L⁻¹ para o nível mínimo. Essas amostras foram agitadas por 5 minutos e colocadas em centrífuga para posterior eliminação do sobrenadante. Essa operação foi realizada duas vezes, com posterior adição de álcool etílico por três vezes, agitado e eliminado o sobrenadante; (c) caulinita saturada com sódio: realizou-se o mesmo procedimento de lavagem da amostra, porém, com acetato de sódio e apenas para um nível máximo de saturação, sendo usados 100 mL de solução acetato de sódio mol L⁻¹.

Tratamento químico das amostras de solos

Os mesmos tratamentos foram aplicados em uma amostra de LR e uma de LB, sendo: (a) solo agitado com água (testemunha), o mesmo procedimento realizado para a caulinita; (b) solo saturado com um nível máximo de cálcio: 20 g de terra foram colocados em erlenmeyer, adicionando 100 mL de solução acetato de cálcio 1 mol L⁻¹ e postos para agitar por

5 minutos. Posteriormente, o material foi centrifugado e o sobrenadante eliminado. Depois disso, o material foi lavado três vezes com álcool etílico e posto para secar a 45°C; (c) solo saturado com nível máximo de sódio: procedimento igual ao anterior, usando, porém, o acetato de sódio. Foram feitas amostras em branco.

Incubação das amostras de solos

Amostras de 0 a 20 cm de cada solo, LR, LB e TB, foram incubadas com carbonato de cálcio, visando atingir dois níveis de saturação, quais sejam, 50 e 100% no complexo de troca, calculadas pelo método do SMP. Na camada de 40 a 60 cm, cada amostra foi incubada com carbonato de cálcio (calculado pelo método do SMP) e com bicarbonato de sódio (calculado pelo método da saturação na CTC) a 50 e 100%. Foram usados 50 g de terra, que foram umedecidos e incubados por 15 dias. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa por 24 h a 45°C e peneiradas em peneiras de 2 mm para homogeneização e posterior obtenção dos dados espectrais.

Obtenção das curvas espectrais

Foi utilizado, em laboratório, o sensor IRIS (Infra Red Intelligent Spectroradiometer), com resolução espectral de 2 nm entre 400 e 1.000 e de 4 nm entre 1.000 e 2.500 nm. O sensor foi colocado a nadir a 27 cm de altura sobre a amostra de solo, a qual foi acondicionada em uma placa de petri com diâmetro de 9 cm, formando uma camada com espessura de 1,5 cm. A fonte de iluminação, uma lâmpada halógena de 600 W, com feixe não colimado para o plano visado, foi posicionada a 61 cm do recipiente amostral, com um ângulo zenital de 15°. Foi utilizada, como padrão de referência, uma placa cinza, com 50% de reflectância calibrada pela Labsphere dos Estados Unidos, cujos dados foram posteriormente corrigidos para 100%. A razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra de solo e o fluxo radiante espectral refletido por um padrão de referência, iluminados e visados sob as mesmas condições geométricas, gera o "fator de reflectância bidirecional espectral" (Nicodemus et al., 1977). Para cada amostra, foi obtido um valor médio entre 2 medições.

Análise estatística

Foram selecionadas 13 faixas de comprimento de onda entre 400 e 2.500 nm, baseadas em dois critérios: (a) nas faixas de reflectância, onde água, matéria orgânica, óxidos de ferro, caulinita e gibbsita causam absorção de energia; (b) nas faixas que não apresentam bandas de absorção, mas que são influenciadas pelos atributos dos solos. As faixas estão indicadas diretamente no quadro 3. Em cada faixa, foi realizado o teste de Tukey, por meio do Statistical Analysis System (SAS, 1989a,b), utilizando a medida da reflectância de cada curva espectral, com o objetivo de verificar em quais faixas as curvas eram discriminadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tratamentos químicos no mineral caulinita-padrão

Os tratamentos com acetato de cálcio e sódio provocaram alterações químicas na amostra de caulinita (Quadro 1). Basicamente, são observadas alterações do pH, alumínio, CTC efetiva e bases trocáveis. O Ca da testemunha aumentou para a saturação máxima. Na testemunha, havia poucas bases e uma CTC efetiva de 29 mmol_c dm⁻³. Com o tratamento de Ca, a CTC efetiva aumentou para 52 mmol_c dm⁻³, juntamente com o aumento de Ca no sistema, em detrimento do potássio, magnésio e alumínio. Os teores de matéria orgânica, por sua vez, praticamente não alteraram.

Ainda com relação à caulinita (Quadro 1), na seqüência testemunha → tratamento mínimo com Ca → tratamento máximo com Ca, aumentaram os valores médios de reflectância das curvas espectrais correspondentes. Eles passaram de 66 para 70 e 79%, respectivamente. As curvas espectrais das amostras tratadas alteraram sua intensidade de reflectância em relação à testemunha (Figura 1).

Baixos teores de matéria orgânica, menores que 20 g kg⁻¹, têm efeito menos efetivo no mascaramento de outros constituintes do solo na reflectância (Baumgardner et al. 1970). No caso, foram observados baixos teores de matéria orgânica na caulinita (Quadro 1) e, portanto, ela deve ter tido pouca influência.

A CTC efetiva se alterou juntamente com o Ca até o nível mínimo. O tratamento com nível máximo de Ca atingiu 285 mmol_c dm⁻³ (Quadro 1) e, nesse caso, o Ca já saturou todo o complexo de troca e a solução. Portanto, o Ca passou a ter influência na reflectância, pois constituía a maior parte da solução do solo. O mesmo fato pôde ser observado com a saturação por Na, que atingiu 175 mmol_c dm⁻³ na saturação máxima na caulinita, com conseqüente aumento na reflectância (Figura 1 e Quadro 1). Tais observações mostram que o Ca e o Na proporcionaram aumento na reflectância.

Todas as curvas espectrais foram estatisticamente diferenciadas nas faixas de 2 a 5 (Quadro 3). Nas faixas de 2 a 6 e 8 a 10, ocorreram diferenças significativas entre a testemunha e as outras amostras. Atingiu-se um máximo de intensidade com a argila saturada com Ca e Na, que não apresentaram diferenças entre si em quase todo o espectro óptico (faixas 1 e 6 a 13).

Na testemunha de caulinita (caulinita agitada com água), ocorreram as bandas de absorção típicas desse mineral em 1.400 nm (absorção média) e 2.200 nm (absorção forte), concordando com Mathews et al. (1973). Segundos esses autores, a banda em 2.200 nm é devida à hidroxila estrutural do mineral. A banda em 1.400 nm deve-se às vibrações das moléculas de água adsorvidas no mineral (Lindberg & Snyder, 1972). Como pode ser observado na figura 1, a posição dessas bandas de absorção não se alteraram.

Quadro 1. Análises químicas anteriores e posteriores aos tratamentos com acetato de cálcio e de sódio nas amostras de caulinita-padrão; idem para acetato de cálcio nas amostras de Latossolo Roxo e Latossolo Bruno (camada de 0 a 20 cm) e os respectivos valores espectrais médios das curvas obtidas

Tratamento	pH	M.O. ⁽¹⁾	Cátions trocáveis				Al	H + Al	S ⁽²⁾	CTC	V	Fe ₂ O ₃ ⁽³⁾	Fator de reflectância médio da curva espectral entre 400 e 2.500 nm ⁽⁴⁾
			Ca	Mg	K	Na							
	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³								%	g kg ⁻¹	
Caulinita-padrão													
Cau-Ag-Testemunha	3,4	6,0	4,0	4	0,4	-	21,0	47	8	55	15	-	0,664
Cálcio-nível mínimo	5,1	5,7	49,0	2	0,3	-	1,0	10	51	61	84	-	0,701
Cálcio-nível máximo	7,6	6,1	285,0	0	0,2	-	0,0	8	285	-	-	-	0,791
Sódio-nível máximo	7,4	6,1	1,0	1	0,2	175	1,0	10	177	-	-	-	0,776
Latossolo Roxo (LR211)													
LR211-Ag-Testemunha	4,0	29	3,0	1	0,7	-	17,0	121	38	125	3	250	0,173
Cálcio-nível máximo	6,9	28	300,0	2	0,5	-	0,0	16	303	-	-	-	0,194
Sódio-nível máximo	6,5	29	1,0	1	0,6	200	3,0	31	203	-	-	-	0,192
Latossolo Bruno (LB41)													
LB41-Ag-Testemunha	3,8	44	1,0	1	0,6	-	24,0	166	3	169	2	171	0,215
Cálcio-nível máximo	6,7	42	300,0	1	0,3	-	0,0	18	301	-	-	-	0,235
Sódio-nível máximo	6,7	42	1,0	1	0,3	240	0,0	31	206	-	-	-	0,242

⁽¹⁾ Matéria orgânica; ⁽²⁾ Soma de bases; ⁽³⁾ Ferro total: extraído pelo ataque sulfúrico; ⁽⁴⁾ Esses valores referem-se à média do valor de reflectância de toda a curva espectral, de cada amostra, entre 400 e 2.500 nm; "-" não analisado.

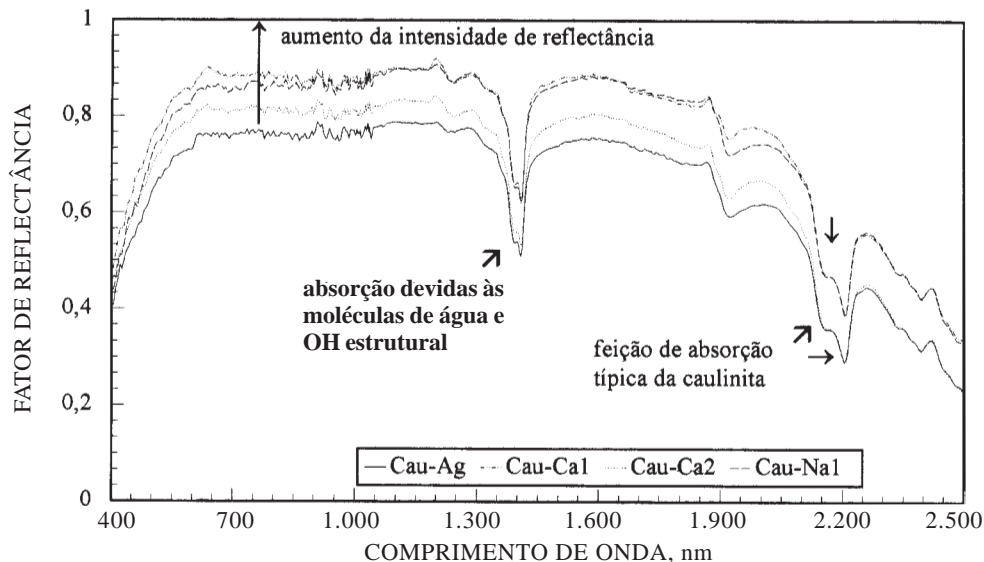


Figura 1. Curvas espectrais: caulinita-padrão, agitada com água (Cau-Ag), saturada a nível máximo (Cau-Cal) e mínimo (Cau-Ca2) com acetato de cálcio e a um nível máximo com acetato de sódio (Cau-Na1).

Tratamentos químicos em amostras de solos da camada superficial

Mineralogicamente, no caso do LR, há dominância de caulinita e pouca gibbsita (Demattê, 1995; Demattê et al., 1996). A curva espectral da testemunha desse solo (Figura 2a) indicou a presença de caulinita a 2.200 nm, banda semelhante à da figura 1 desse mineral, porém, com menor intensidade. A presença de gibbsita é manifestada na banda a 2.265 nm (Madeira Netto et al., 1993a). O solo desenvolvido de rocha ácida, LB (Figura 2b), apresentou caulinita e gibbsita em sua constituição (Demattê, 1995; Demattê et al., 1996), que refletiram na curva espectral desse solo. Em ambos os solos, os altos teores de ferro (Quadro 1) proporcionaram concavidades centradas em 500 e 850 nm (Sherman & Waite, 1985). Por sinal, a curva da caulinita expressou a ausência de ferro livre, através da inexistência da concavidade nesses comprimentos da onda (Figura 1).

Como no caso da caulinita, os tratamentos com acetato de cálcio e de sódio em amostras de solos provocaram alterações no pH, bases trocáveis, alumínio e CTC efetiva (Quadro 1). Não ocorreram alterações no teor de matéria orgânica.

As intensidades de reflectância aumentaram da testemunha para as amostras saturadas por Ca e Na (Figura 2a,b). A curva espectral do LR211-Ag (testemunha) apresentou menor teor de Ca e menor reflectância ($3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $0,173$, respectivamente, Quadro 1). Da mesma forma, a amostra com maior teor de Ca ($300 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) apresentou maior reflectância ($0,194$). O mesmo ocorreu para o Na. Por sinal, não ocorreram diferenças entre as curvas das amostras tratadas com Ca e Na (Figura 2a). As

feições de absorção desses solos não foram alteradas no intervalo espectral estudado (400 a 2.500 nm).

As mesmas tendências de comportamento foram observadas no LB (Figura 2b). Neste caso, as amostras do LB saturadas com Ca e Na obtiveram reflectância maior de 650 a 2.500 nm, em relação à testemunha. A reflectância média da curva da testemunha passa de $0,215$ para $0,242$ na curva com saturação máxima com sódio (Quadro 1). Aliás, bases como o Ca e Mg tiveram correlações significativas com a reflectância para Schreier (1977).

Incubação com carbonato de cálcio e bicarbonato de sódio em amostras de solos da camada superficial

Os tratamentos por incubação com carbonato de Ca possibilitaram obter de forma mais natural a saturação por bases no complexo de troca, simulando processo semelhante à calagem. Apesar de ocorrer a saturação do complexo coloidal pelo Ca, também ocorreram reações relativas ao carbonato, como a neutralização dos H responsáveis pela acidez nos solos, aumento da CTC efetiva, precipitação do alumínio e reações com água e matéria orgânica (Raij, 1991).

As amostras da camada superficial do LR que receberam carbonato de Ca em duas dosagens 50 e 100%, apresentaram aumento da reflectância em todo espectro óptico (Figura 3a) em relação à testemunha. Praticamente, não houve diferença de reflectância entre as curvas com maior e menor dosagem de carbonato de Ca (Quadro 2). Entretanto, no LB, o efeito das dosagens manifestou-se de 400 a 1.300 nm, chegando a ocorrer uma inversão a partir desse comprimento de onda (Figura 3b).

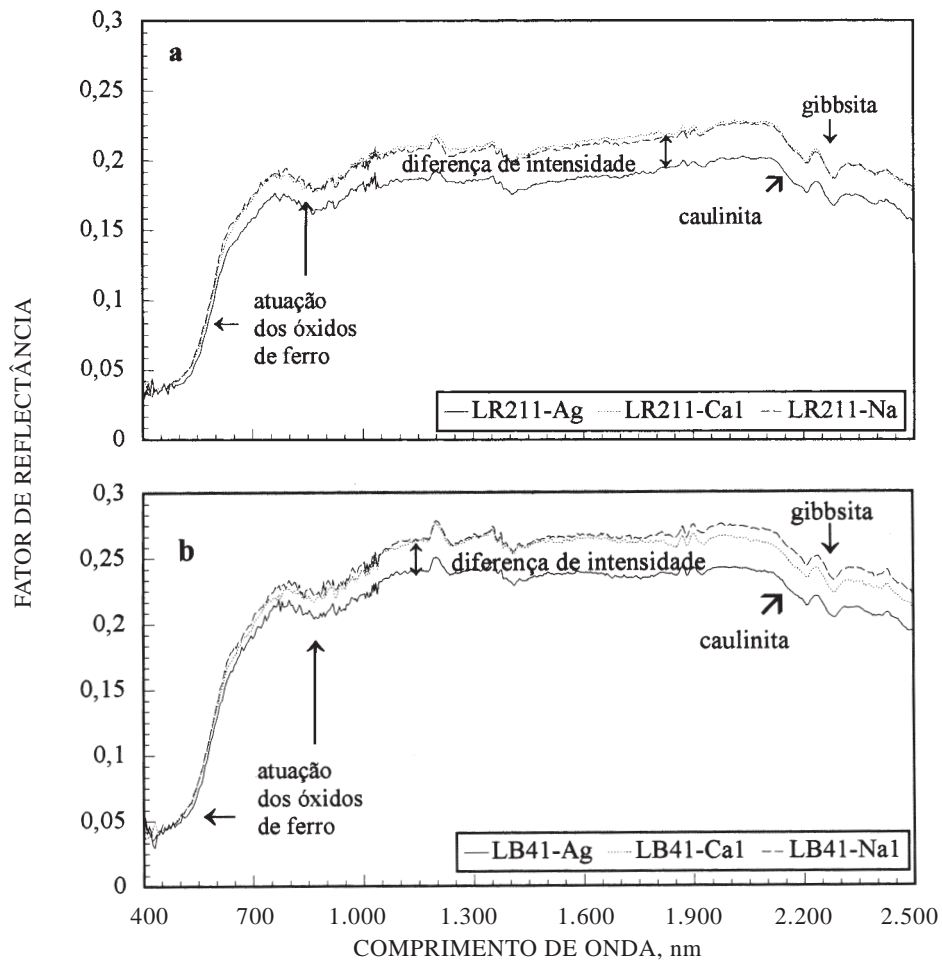


Figura 2. Curvas espectrais de amostras da camada 0-20 cm: (a) Latossolo Roxo, agitado com água (LR211-Ag), saturado a nível máximo com acetato de cálcio (LR211-Ca1) e com acetato de sódio (LR211-Na1); (b) Latossolo Bruno, agitado com água (LB41-Ag), saturado a nível máximo com acetato de cálcio (LB41-Ca1) e com acetato de sódio (LB41-Na1).

A TB apresenta mineralogia basicamente caulínica (evidenciada pela banda a 2.200 nm na Figura 3c), com muito pouca gibbsita (Demattê, 1995; Demattê et al., 1996). Nesse solo, houve diferenças entre a testemunha e a dosagem a 50%, porém não houve diferenças entre a maior dosagem e a testemunha, em todo o espectro óptico estudado.

As evidências de alteração da intensidade de reflectância em função das alterações químicas não estão muito claras nessas amostras da camada superficial. Boa parte da CTC dessa camada é devida à matéria orgânica. Assim, os cátions estão absorvidos aos radicais orgânicos. Provavelmente, os elevados teores de matéria orgânica, na faixa de 50 g kg⁻¹ (Quadro 2), podem estar mascarando os efeitos de outros elementos dos solos na reflectância, conforme preconizado por Baumgardner et al. (1970). Portanto, como o Ca não é considerado um elemento de grande influência na reflectância, sua expressão não se manifestou de forma clara neste caso.

O efeito de mascaramento devido à matéria orgânica pode ser observado nas amostras da camada de 40 a 60 cm, onde os teores de matéria orgânica diminuíram significativamente, com 20 g kg⁻¹ no LR, 26 g kg⁻¹ no LB e 15 g kg⁻¹ na TB (Quadro 2). Com isso, nos três solos, o efeito do ferro sobre a reflectância aumentou (sobressaiu) na testemunha, promovendo uma concavidade mais forte em 900 nm (Figura 4), em relação às amostras da camada superficial (Figura 3). Isso mostra que, da mesma forma que mascarou o efeito do ferro na camada superficial, a matéria orgânica pode ter mascarado e alterado o efeito do Ca, explicando por que não foram tão evidentes as relações entre os teores desse elemento e a intensidade de reflectância. Da mesma forma, isso poderia explicar as inversões de comportamento das curvas da camada superficial, principalmente do LB e da TB, em relação aos tratamentos, conforme descrito anteriormente. Isso pode ser observado, por exemplo, no quadro 2, onde

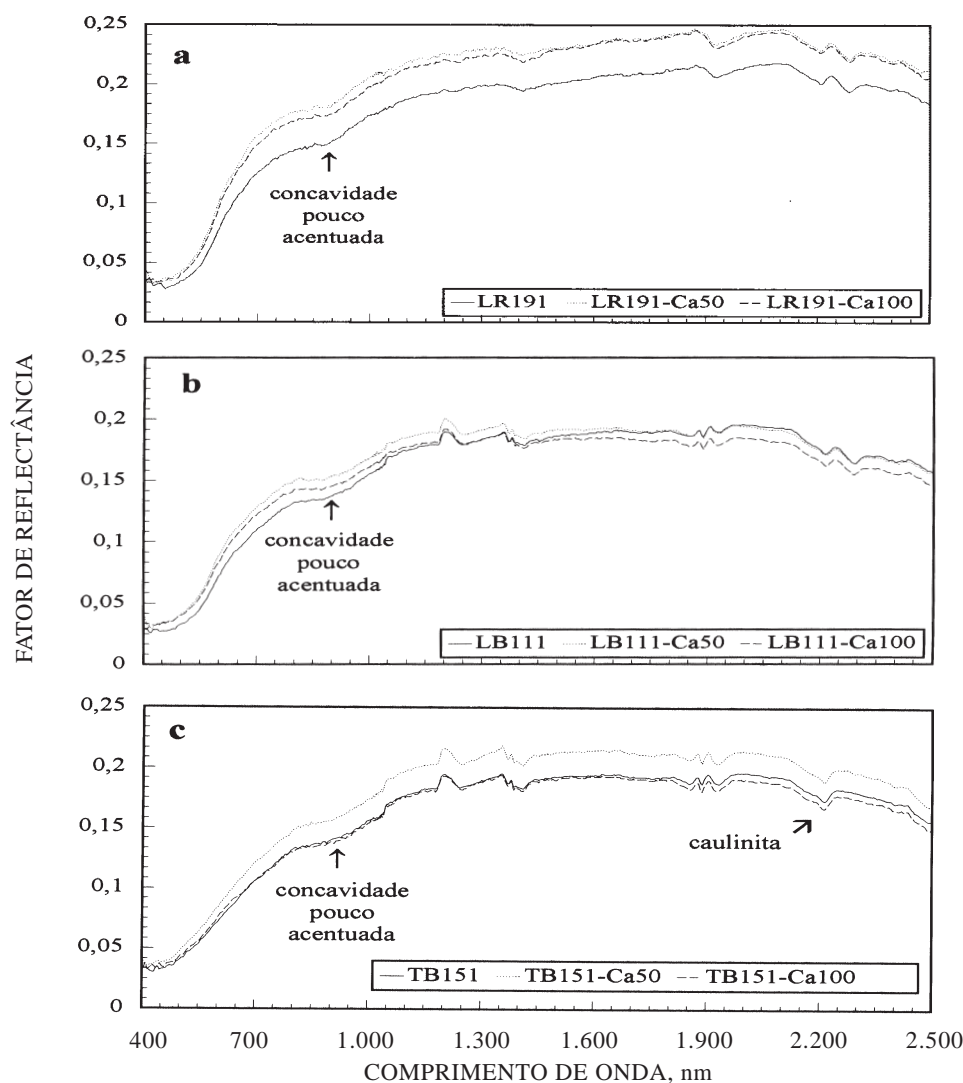


Figura 3. Curvas espectrais dos tratamentos de amostras de solos da camada de 0-20 cm incubadas em 50 e 100% da saturação por bases com CaCO_3 : (a) Latossolo Roxo, LR191 (testemunha); (b) Latossolo Bruno, LB111 (testemunha); (c) Terra Bruna Estruturada, TB151 (testemunha).

a amostra TB151 com nível máximo de cálcio apresentou reflectância média de 0,158, inferior à do tratamento com nível mínimo de cálcio.

Incubação com carbonato de cálcio e bicarbonato de sódio em amostras de solos da camada subsuperficial

Da mesma forma que o realizado nas amostras da camada superficial, neste ensaio, a saturação do complexo de troca foi por incubação com carbonato de cálcio e de sódio, a fim de possibilitar obter de forma mais natural a saturação por bases no complexo de troca, simulando processo semelhante à calagem.

Nas curvas espectrais tratadas (Figura 4), ocorreram aumentos nas intensidades de reflectância

em todo o espectro óptico estudado. As relações entre aumento da reflectância e alterações químicas nos solos foram mais evidentes do que o ocorrido na camada superficial, possivelmente devidas à menor interferência da matéria orgânica nas camadas subsuperficiais.

Estatisticamente, todas as curvas espectrais das amostras dos tratamentos do LB42 foram discriminadas na maior parte do espectro óptico, nas faixas 3 a 6, 9, 10, 12 e 13 (Quadro 3). Todas as curvas espectrais dos tratamentos com Ca ou Na (Figura 4) apresentaram reflectâncias maiores que as das testemunhas, na maior parte do espectro óptico. No quadro 2, observa-se, ainda, que a média da reflectância das testemunhas foi menor que a das amostras tratadas nos três solos.

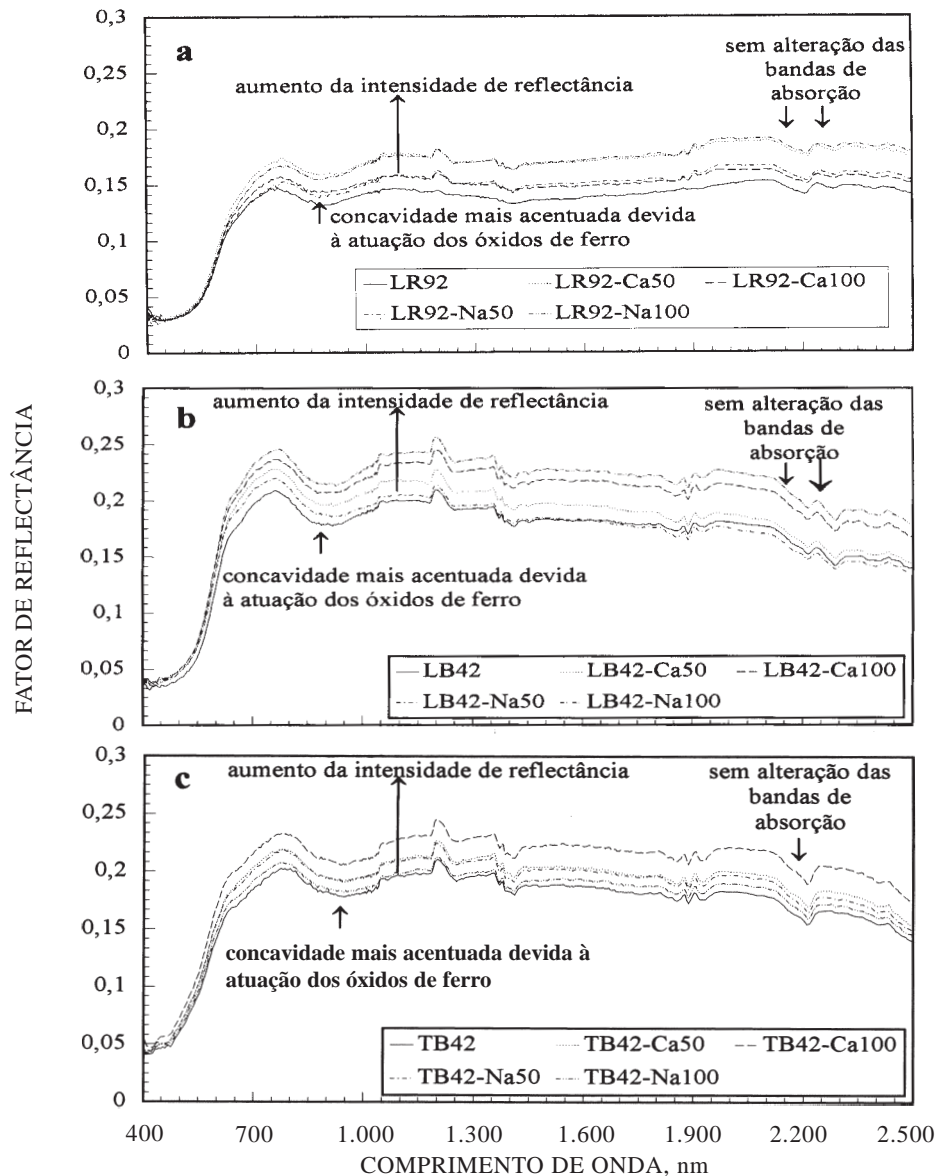


Figura 4. Curvas espectrais dos tratamentos de amostras de solos da camada de 40-60 cm incubadas em 50 e 100% de saturação por bases com CaCO_3 : (a) Latossolo Roxo, LR92 (testemunha); (b) Latossolo Bruno, LB42 (testemunha); (c) Terra Bruna Estruturada, TB42 (testemunha).

Os solos analisados, de baixa saturação por bases quando no estado natural (Quadro 2), têm mais alumínio trocável do que bases trocáveis. As incubações mostraram alterações nos teores de Ca e na CTC efetiva (Quadro 2), atribuídas às reações no solo promovidas pelos produtos aplicados. Com a aplicação de carbonato de Ca ou de Na no sistema, os H vêm para solução, liberando as posições de troca, que são ocupadas por um desses cátions, dependendo do tratamento. Conseqüentemente, ocorre alteração da CTC efetiva e do V%. O LR saiu de 13 para 83% de V, no tratamento com 100% de cálcio. O LB passou de 6 para 66% e a TB de 4 para 73%. Essas alterações do V% foram reflexos do aumento da soma de bases.

No LR, o Ca aumentou 10 vezes, no LB 37 vezes e na TB 65 vezes, em relação à testemunha. Para o Na, grandes diferenças também foram observadas em relação à testemunha (Quadro 2). A CTC efetiva também aumentou muito em todos os casos. Além disso, o alumínio trivalente (que possui 6 moléculas de água na sua constituição) na superfície de troca, passou para a solução do solo sofrendo hidrólise, ficando precipitado com três moléculas de água (Raij, 1991).

Tais observações demonstram que os elementos responsáveis pela maior refletividade nesses tratamentos foram o Ca e o Na. Porém, a intensidade de reflectância só aumentou entre as curvas

Quadro 2. Análise química das amostras de solos antes e depois dos tratamentos com incubação de CaCO₃ e NaCO₃, objetivando atingir saturações a 50 e 100% da CTC, nas camadas 0-20 e 40-60 cm de Latossolo Roxo, Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada e os respectivos valores espectrais médios das curvas obtidas

Tratamento	pH	M.O. ⁽¹⁾	Cátions trocáveis				Al	H + Al	S ⁽²⁾	CTC	CTCe ⁽³⁾	V	Fe ₂ O ₃ ⁽⁴⁾	Fator de reflectância médio da curva espectral entre 400 e 2.500 nm ⁽⁵⁾	
			Ca	Mg	K	Na									
	CaCl ₂	g kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³						%	g kg ⁻¹					
Latossolo Roxo (LR 191: 0-20 cm)															
Testemunha	4,1	59	14	4	3,4	-	20	166	21	187	41	11	227	0,175	
Cálcio-50%	5,0	57	110	4	1,6	-	2	88	115	203	117	57	-	0,202	
Cálcio-100%	5,9	58	155	4	1,8	-	1	47	161	208	162	77	-	0,199	
Latossolo Roxo (LR 92: 40-60 cm)															
Testemunha	4,2	20	8	4	0,4	0,2	12	80	12	92	24	13	235	0,132	
Cálcio-50%	5,1	16	51	3	1,0	-	0	34	55	89	55	62	-	0,161	
Cálcio-100%	6,2	14	86	4	0,4	-	0	18	90	108	90	83	-	0,141	
Sódio-50%	5,0	16	10	3	0,8	58	1	42	72	114	73	63	-	0,142	
Sódio-100%	5,8	13	10	3	0,7	108	1	28	122	150	123	81	-	0,160	
Latossolo Bruno (LB 111: camada 0-20 cm)															
Testemunha	3,9	44	2	2	0,7	-	20	150	5	155	25	3	174	0,157	
Cálcio-50%	4,8	47	78	2	0,9	-	3	80	81	161	84	50	-	0,163	
Cálcio-100%	5,9	46	90	1	1,0	-	2	34	92	126	94	93	-	0,156	
Latossolo Bruno (LB 42: camada 40-60 cm)															
Testemunha	4,5	26	1	1	0,4	0,2	6	38	3	41	9	6	182	0,167	
Cálcio-50%	5,2	20	18	1	0,5	-	1	25	20	45	21	44	-	0,179	
Cálcio-100%	6,3	11	37	1	0,5	-	0	20	39	59	39	66	-	0,197	
Sódio-50%	5,3	8	2	1	0,4	28	0	25	31	56	31	56	-	0,169	
Sódio-100%	6,0	10	1	1	0,2	50	0	20	52	72	52	72	-	0,206	
Terra Bruna Estruturada (TB 151: 0-20 cm)															
Testemunha	3,8	56	1	1	0,7	-	36	205	3	208	39	1	141	0,160	
Cálcio-50%	4,9	57	101	2	7,0	-	6	88	105	193	111	54	-	0,177	
Cálcio-100%	5,6	56	135	1	1,6	-	3	47	138	185	141	75	-	0,158	
Terra Bruna Estruturada (TB 42: 40-60 cm)															
Testemunha	4,2	15	1	1	0,4	0,2	12	64	3	67	15	4	128	0,171	
Cálcio-50%	4,4	10	19	1	0,7	-	1	42	21	63	22	33	-	0,186	
Cálcio-100%	5,9	13	65	1	0,5	-	0	25	67	92	67	73	-	0,203	
Sódio-50%	5,0	11	3	1	0,6	50	1	38	55	93	56	59	-	0,184	
Sódio-100%	5,9	14	5	1	0,4	70	0	31	76	107	76	71	-	0,176	

⁽¹⁾ Matéria orgânica; ⁽²⁾ Soma de bases; ⁽³⁾ CTC efetiva; ⁽⁴⁾ Ferro total: extraído pelo ataque sulfúrico; ⁽⁵⁾ Esses valores referem-se à média do valor de reflectância de toda a curva espectral, de cada amostra, entre 400 e 2.500 nm, "-" não analisado.

espectrais da testemunha para as amostras tratadas, porque, nesta mesma seqüência, houve aumento das posições de troca nos colóides, aumentando a capacidade de retenção desses cátions, que, por sua vez, aumentaram a reflectância.

Boluda et al. (1993) observaram um aumento na intensidade de reflectância dos solos mais pobres para os mais ricos em carbonato de cálcio, principalmente entre 400 e 1.950 nm. Nesse caso, não seria o carbonato a influir na reflectância, como observado por Boluda et al. (1993), mas os produtos das reações por ele promovidas.

Com a aplicação do carbonato de Ca, houve um aumento no pH do solo, favorecendo a atuação

microbiana e, conseqüentemente, a decomposição da matéria orgânica (El-Tarabily et al., 1996). Nas amostras tratadas dos três solos, o teor de matéria orgânica diminuiu em relação à testemunha (Quadro 2). Como menores teores de matéria orgânica podem promover aumento na intensidade de reflectância (Mathews et al., 1973), tal fator pode ter, também, contribuído nas alterações na magnitude espectral em todo o espectro óptico (Figura 4).

Entretanto, a faixa de atuação da matéria orgânica na reflectância ainda não está bem compreendida. Demattê (1995) verificou aumento de reflectância de amostras da primeira camada (com maior teor de matéria orgânica) para a segunda

camada (com pouca matéria orgânica) na faixa entre 400 e 1.200 nm, (Figura 5), nos solos LR, LB e TB, concordando com Coleman & Montgomery (1978), que estudaram solos americanos. Autores, como Courault & Girard (1988) e Madeira Netto (1993), observaram que a remoção de matéria orgânica aumentava a reflectância em todo o espectro óptico de 400 a 2.500 nm.

As observações de Demattê (1995) foram avaliar a diferença espectral em função da profundidade do solo com a respectiva diferença da matéria orgânica.

Não aplicou nenhum produto que pudesse alterar quimicamente os constituintes das amostras. Madeira Netto (1993) removeu a matéria orgânica através de H_2O_2 , não sendo, portanto, de maneira natural. No presente caso, foram adicionados a uma mesma amostra de solo produtos que, à semelhança do calcário, causaram naturalmente reações químicas.

Portanto, todas as alterações químicas observadas, produtos da aplicação do carbonato de cálcio, foram conjuntamente responsáveis pelas alterações na reflectância espectral.

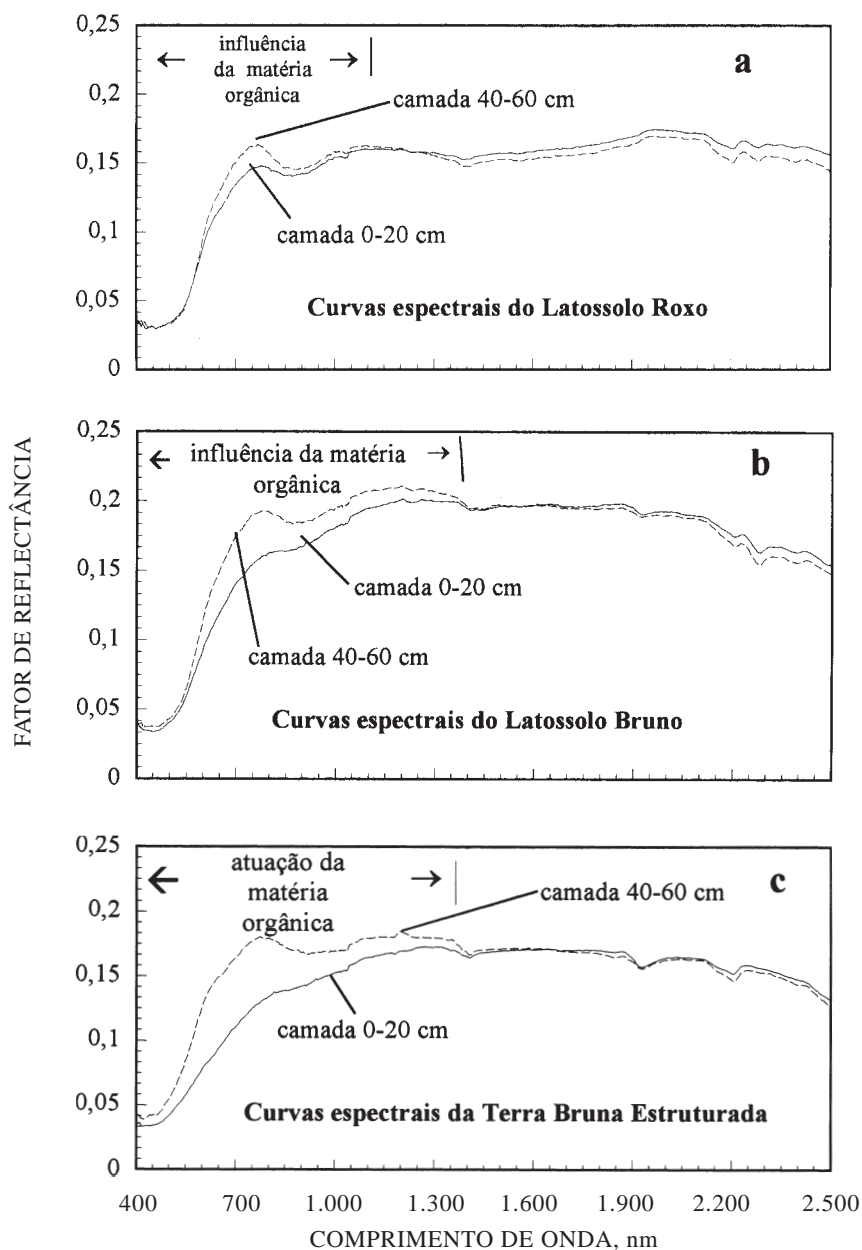


Figura 5. Curvas espectrais comparativas entre as camadas de 0-20 cm para os solos Latossolo Roxo, Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada, com relação aos efeitos espectrais da matéria orgânica. Fonte: Demattê (1995).

Quadro 3. Análise estatística⁽¹⁾ dos resultados médios de reflectância por faixa espectral selecionada, com o intuito de verificar a discriminação das curvas espectrais obtidas nas figuras 1 e 4b

Sigla da curva espectral (tratamento)	Faixas espectrais selecionadas, nm												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	410,5 a 532,6	537,8 a 679,0	684,9 a 822,4	826,9 a 952,1	956,2 a 1082,1	1118,9 a 1270,9	1300,3 a 1460,3	1500,0 a 1802,4	1820,5 a 1992,3	1997,2 a 2109,2	2114,0 a 2241,7	2246,4 a 2329,7	2334,3 a 2497,5
Discriminação estatística das curvas espectrais existentes na figura 1 (Tratamentos na Caulinita)⁽²⁾													
	** (5)	**	**	**	**	**	**	**	**	**	ns	**	**
Cau-Ca1	0,68 ⁽⁴⁾ A ⁽³⁾	0,87 A	0,89 A	0,88 A	0,88 A	0,89 A	0,80 A	0,87 A	0,80 A	0,73 A	0,50 A	0,53 A	0,42 A
Cau-Na1	0,64 BA	0,84 B	0,86 B	0,86 B	0,87 B	0,89 A	0,79 A	0,87 A	0,78 A	0,72 A	0,50 A	0,53 A	0,41 A
Cau-Ca2	0,63 BA	0,80 C	0,81 C	0,81 C	0,81 C	0,82 B	0,71 B	0,79 B	0,69 B	0,63 B	0,39 B	0,43 B	0,31 B
Cau-Ag (testemunha)	0,58 B	0,74 D	0,76 D	0,76 D	0,77 D	0,78 C	0,67 B	0,74 C	0,64 C	0,59 C	0,39 B	0,42 B	0,31 B
Discriminação estatística das curvas espectrais existentes na figura 4b (Tratamentos no Latossolo Bruno, LB42)⁽²⁾													
	** (5)	ns	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
LB42-Ca100	0,05 ⁽⁴⁾ A ⁽³⁾	0,15 A	0,23 A	0,21 A	0,22 A	0,23 A	0,22 A	0,22 A	0,21 A	0,21 A	0,19 A	0,18 A	0,18 A
LB42-Na100	0,05 A	0,15 A	0,24 B	0,22 B	0,23 B	0,24 B	0,23 B	0,23 B	0,22 B	0,22 B	0,21 B	0,19 B	0,19 B
LB42-Na50	0,04 BA	0,14 A	0,21 C	0,19 C	0,20 C	0,20 C	0,19 D	0,18 D	0,17 C	0,17 C	0,16 D	0,14 C	0,14 C
LB42-Ca50	0,04 B	0,14 A	0,22 D	0,20 D	0,21 D	0,22 D	0,20 C	0,19 C	0,19 D	0,19 D	0,17 C	0,15 D	0,15 D
LB42 (testemunha)	0,04 B	0,13 A	0,20 E	0,18 E	0,19 E	0,20 E	0,19 D	0,18 D	0,18 E	0,18 E	0,16 D	0,15 E	0,15 E

⁽¹⁾ Em cada faixa de comprimento de onda selecionada, foi obtida a média de reflectância da curva espectral de cada tratamento. Nessas médias, foi aplicado o teste de Tukey, para verificar a discriminação em cada faixa de comprimento de onda; ⁽²⁾ Este teste foi realizado nas curvas espectrais que estão ilustradas nas figuras mencionadas; ⁽³⁾ A interpretação deve ser feita na mesma coluna, entre os tratamentos. Tratamentos com letras iguais, na coluna, indicam que as médias da reflectância não diferem entre si; ⁽⁴⁾ Os valores de reflectância média foram arredondados para duas casas decimais. A avaliação estatística foi realizada para valores com 7 casas decimais; ⁽⁵⁾ ** significância a 1%, ^{ns} não-significativo.

CONCLUSÕES

1. A aplicação de acetato de cálcio ou de sódio no mineral de argila caulinita acarretou o aumento da magnitude da reflectância em todo o espectro óptico estudado, sem alterar as bandas de absorção do mineral. Nesse caso, o cálcio e o sódio foram os principais responsáveis pelo aumento da reflectância.

2. A aplicação de acetato de cálcio ou de sódio nas amostras dos três solos promoveu o aumento no teor de cálcio e sódio e, conseqüentemente, maior reflectância em todo o espectro óptico.

3. A incubação com carbonato de cálcio ou de sódio nas amostras da camada de 0 a 20 cm apresentou tendências pouco consistentes em relação ao aumento da reflectância. Provavelmente, tal ocorrência deveu-se aos altos teores de matéria orgânica nessa camada, que mascararam os efeitos das aludidas alterações químicas na reflectância.

4. As incubações com carbonato de cálcio ou bicarbonato de sódio nas amostras de solos da camada de 40 a 60 cm promoveram alterações químicas, que contribuíram, conjuntamente, no aumento da magnitude da reflectância em todo o espectro eletromagnético.

LITERATURA CITADA

- AL-ABBAS, A.H.; SWAIN, P.H. & BAUMGARDNER, M.F. Relating organic matter and clay content to multispectral radiance of soils. *Soil Sci.*, 114:477-485, 1972.
- BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOF, S.J.; JOHANNSEN, C.J. & ZACHARY, A.L. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Proceedings. Ind. Acad. Sci.*, 79:413-422, 1970.
- BOLUDA, R.; COLOMER, J.C.; MORELL, C. & SÁNCHEZ, J. Estudio de las curvas de reflectividad y su relacion con las propiedades de los suelos en zona semiarida (Castilla-la Mancha, España). In: CONGRESSO IBEROAMERICANO DE LA CIÊNCIA DEL SUELO, España, 1993. Anais. Salamanca, 1993. p.1-8.
- BOWERS, S.A. & HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100:130-138, 1965.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas, Instituto Agronomico, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106)
- CHAPMAN, H.D. & PRATT, P.F. *Methods of analysis for soils, plants and waters.* Riverside, University of California, Division of Agricultural Sciences, 1961. 309p.

- 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. Rem. Sens.*, 53:1659-1663, 1987.
- COURAULT D. & GIRARD, M.C. Relationships between the soils composition and their spectral signature. In: SYMPOSIUM OF THE WORKING GROUP REMOTE, 5., Budapest, 1988. Proceedings. Budapest, ISSS, 1988. p.178-185.
- DEMATTÊ, J.A.M. Relações entre dados espectrais e características físicas, químicas e mineralógicas de solos desenvolvidos de rochas eruptivas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1995. 265 p. (Tese de Doutorado)
- DEMATTÊ, J.A.M.; GARCIA, G.J. & PROCHNOW, L.I. Relações entre a reflectância espectral e atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos desenvolvidos de rochas eruptivas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia, 1996. Resumos. Águas de Lindóia, 1996. CD-ROM.
- EL-TARABILY, K.A.; HARDY, G.E.; SIVASITHAMPARAM, K. & KURTBOKE, I.D. Microbiological differences between limed and unlimed soils and their relationship with cavity disease of carrots (*Daucus carota* L.) caused by *Pythium coloratum* in Western Australia. *Plant Soil*, 183:279-290, 1996.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do estado do Paraná. Londrina, 1984. t.1. 412p. (Boletim Técnico)
- 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, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, 1992. 131p. (Relatório INPE)
- LINDBERG, J.D. & SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. *Am. Mineral.*, 57:485-493, 1972.
- 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 2.500 nm). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. Anais. Curitiba, 1993a. v3, p.249-55.
- MADEIRA NETTO, J.S. Étude quantitative des relations constituants minéralogiques - réflectance diffuse des latossols brésiliens. Applications à l'utilisation pédologique des données satellitaires TM (région de Brasília). Paris, Éditions de L'ORSTOM, 1993. 236p.
- MATHEWS, H.L. CUNNINGHAM, R.L. & PETERSEN, G.W. Spectral reflectance of selected pennsylvania soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 37:421-424, 1973.
- MONTGOMERY, O.L. An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical, and genetic characteristics of soils. West Lafayette, Purdue University, 1976. p.143. (Tese de Doutorado)
- 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. 52 p. (NBS Monograph, 160)
- RAIJ, B. van. & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise de solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1983. 40p. (Boletim Técnico, 81)
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. Piracicaba, Agrônoma Ceres, 1991. 343p.
- SAS. Statistical Analysis System Institute. SAS/STAT[®] User's guide, version 6, 4th ed. Cary, nc: SAS Institute Inc., 1989a. v.1. 943p.
- SAS. Statistical Analysis System Institute. SAS/STAT[®] User's guide, version 6, 4th ed. Cary, nc: SAS Institute Inc., 1989b. v.2. 846p.
- SCHREIER, H. Quantitative predictions of chemical soil conditions from multi-spectral airborne, ground and laboratory measurements. In: CANADIAN SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING, 4., Ottawa, 1977. Proceedings. Ottawa, Canadian Aeronautics & Space Inst., 1977. p.106-112.
- SHERMAN, D.M. & WAITE, T.D. Electronic spectra of Fe⁺³ oxide hydroxides in the near IR to near U.V. *Am. Miner.*, 70:1262-1269, 1985.