



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Brasil

DEMATTÉ, J. A. M.; GARCIA, G. J.

AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS DE LATOSSOLO BRUNO E DE TERRA BRUNA ESTRUTURADA DA  
REGIÃO DE GUARAPUAVA, PARANÁ, POR MEIO DE SUA ENERGIA REFLETIDA

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 23, núm. 2, 1999, pp. 343-355

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo  
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218287019>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

# AVALIAÇÃO DE ATRIBUTOS DE LATOSSOLO BRUNO E DE TERRA BRUNA ESTRUTURADA DA REGIÃO DE GUARAPUAVA, PARANÁ, POR MEIO DE SUA ENERGIA REFLETIDA<sup>(1)</sup>

J. A. M. DEMATTÉ<sup>(2)</sup> & G. J. GARCIA<sup>(3)</sup>

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar espectralmente amostras de Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada, provenientes de rochas vulcânicas ácidas na região Centro Sul do estado do Paraná, nas profundidades de 0-20 e 40-60 cm. Foram realizadas a caracterização, discriminação e previsão dos atributos desses solos por meio de sua energia refletida, obtidas em laboratório, pelo sensor IRIS, na faixa espectral de 400 a 2.500 nm. Foi possível discriminar os solos pela intensidade de reflectância e feições de absorção, apesar de apresentarem altos teores de óxidos de ferro, matéria orgânica e textura muito argilosa. A análise discriminante foi 100% eficiente na separação dos solos por sua energia refletida. A gibbsita, a matéria orgânica, a CTC e a tonalidade e a intensidade da cor foram os atributos dos solos que apresentaram equações múltiplas com coeficientes de correlação mais elevados, para sua previsão, por meio da energia refletida.

**Termos de indexação:** reflectância, química e física de solos, mineralogia de solos, sensoriamento remoto.

**SUMMARY:** EVALUATION OF ATTRIBUTES OF A HAPLOHUMOX AND A TROPOHUMULT FROM GUARAPUAVA, PARANÁ, BY REFLECTED ENERGY

The objective of this work was to study the spectral reflectance of a Brown Latosol (Haplohumox) and "Terra Bruna Estruturada" (Tropohumult) developed from volcanic acid rocks which occur in the center-south region of Paraná, Brazil. These soil samples were

<sup>(1)</sup> Parte da Tese de Doutorado, apresentada pelo primeiro autor a Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ/USP, em 6 de abril de 1995, Piracicaba (SP). Recebido para publicação em julho de 1996 e aprovado em dezembro de 1998.

<sup>(2)</sup> Professor Doutor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. Caixa postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jamdemat@carpa.ciagri.usp.br.

<sup>(3)</sup> Professor Titular do Departamento de Cartografia, UNESP. Caixa Postal 178, CEP: 13 506-700 Rio Claro (SP).

*collected at depths of 0-20 and 40-60 cm. The characterization, discrimination and estimation of the soil attributes were studied by their reflected energy determined at the wavelength interval of 400 to 2.500 nm using an IRIS laboratory spectroradiometer. It was possible to separate both soils using their reflectance intensity and absorption features, although both soils had high iron, organic matter content and a clayey texture. Discriminant analyses were 100% effective in the separation of soils by their spectral reflectance. The results, which were analysed by linear multivariate equations, indicated that gibbsite, organic matter, CEC and the value and chroma soil color were the attributes presenting the highest correlation coefficients for their estimation by using spectral reflectance.*

Index terms: reflectance, soil chemistry and physics, soil mineralogy, Haplohumox and Tropohumult, remote sensing.

## INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto tem sido considerado importante ferramenta nos mais diversos aspectos relacionados com a agronomia e, em particular, com os estudos de solos. Nesta área, melhor entendimento tem sido buscado nas relações existentes entre as curvas espectrais e as características específicas dos solos que permitam sua discriminação e caracterização.

Neste sentido, estudos visam correlacionar as particularidades das curvas espectrais com as características pertinentes ao solo como a textura, o teor de matéria orgânica, a mineralogia das diversas frações, à semelhança de Mathews et al. (1973), Stoner & Baumgardner (1981); Kosmas et al. (1984); Coleman et al. (1991), além de outros autores.

Por outro lado, há necessidade de se conhecer adequadamente o comportamento da energia refletida de solos tropicais, considerando os poucos estudos nesta área; no Brasil, citam-se os trabalhos de Formaggio (1983); Epiphanio et al. (1992); Formaggio et al. (1996). Além disso, a quantificação de atributos do solo por meio dos dados de reflectância tem sido pouco explorada, daí a necessidade do seu desenvolvimento. Nesta linha, podem-se citar os trabalhos de Coleman et al. (1991, 1993), que, utilizando modelos estatísticos, procuraram quantificar alguns atributos dos solos por meio de sua energia refletida.

Com o advento de novos sensores e com a intensificação da utilização da tecnologia na agricultura, o desenvolvimento de técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao estudo dos solos torna-se importante. Nesse aspecto, a avaliação do comportamento espectral dos solos poderia auxiliar mais rapidamente a obtenção de informações relativas à sua caracterização.

Pretendeu-se, neste trabalho, caracterizar o comportamento espectral de amostras de Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada, provenientes de rochas vulcânicas ácidas da região de Guarapuava,

estado do Paraná, na faixa espectral de 400 a 2.500 nm, em laboratório, verificando as influências de alguns atributos físicos, químicos e mineralógicos na energia refletida. Usando equações lineares múltiplas obtidas com os dados de reflectância, buscou-se verificar a quantificação de atributos desses solos. Supõe-se que, apesar de os solos mostrarem altos teores de ferro, matéria orgânica e textura muito argilosa, haverá diferenças espetrais.

## MATERIAL E MÉTODOS

**Solos e área de estudo** - As amostras estudadas pertencem a solos classificados como Latossolo Bruno (LB - Haplohumox) e Terra Bruna Estruturada (TB - Tropohumult), provenientes de rochas vulcânicas ácidas (Riolito), localizadas na região Sul do estado do Paraná, entre as latitudes 51°16' e 51°40'S e as longitudes 25°09' e 25°30'WGr. Tal região tem, Guarapuava como município principal, numa área com dimensão de 1.451,5 km<sup>2</sup> e está localizada no Planalto de Guarapuava, fazendo parte do Terceiro Planalto ou Planalto do Trapp do Paraná. As rochas pertencem à formação Serra Geral do grupo São Bento.

**Coleta e preparo das amostras de solo e obtenção de curvas espectrais** - Foram coletadas amostras nas profundidades de 0-20 cm (15 amostras) e de 40-60 cm (cinco amostras) de solos previamente reconhecidos por meio de checagem no mapa (escala 1:300.000, EMBRAPA, 1984), da posição no relevo, das tradagens e exames de perfis. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 45°C, por 24 h, sendo destorreadas e passadas por uma peneira de 2 milímetros.

Utilizou-se o espetrorradiômetro Infra Red Intelligent Spectroradiometer em laboratório, com resolução de 2 nm entre 400 e 1.100 nm e 4 nm entre 1.100 e 2.500 nm. A geometria para aquisição dos dados encontra-se na figura 1. Foi utilizada como padrão uma placa spectralon cinza, com 50% de

reflectância. Posteriormente, os dados foram corrigidos para reflectância de 100%. A razão entre o fluxo radiante espectral refletido pela superfície de uma amostra e o fluxo radiante espectral refletido pelo material de referência, iluminado e visado nas mesmas condições que a superfície da amostra, gera o "fator de reflectância bidirecional". Para cada amostra foram realizadas duas medições, sendo utilizado o valor médio.

**Análises químicas, granulométricas e mineralógicas** - As análises químicas do solo constam de pH ( $\text{CaCl}_2$ ), teor de matéria orgânica, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo método descrito em Rajj & Quaggio (1983). A matéria orgânica foi caracterizada pelo fracionamento químico de acordo com o método de Dabin (1971). Foram determinados os teores de areia grossa, areia fina, silte e argila (Camargo et al., 1986). A sílica, a alumina e o ferro foram determinados pelo ataque sulfúrico (Camargo et al., 1986). A determinação do ferro amorfó foi feita após tratamento com solução ácida de oxalato de amônio (McKeague & Day, 1966). No texto e tabelas, o termo "ferro livre" refere-se ao somatório do "ferro livre + ferro amorfó", obtido após tratamento com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Holmgren, 1967).

Foram realizadas análises mineralógicas para as frações areia, silte e argila de acordo com Jackson (1969). Essa análise consistiu de um pré-tratamento para eliminação dos agentes cimentantes, dentre eles a matéria orgânica (usando água oxigenada a 30%) e os óxidos de ferro (tratamento com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio). A seguir, procedeu-se à separação granulométrica em fração areia, por meio da tamisagem úmida, em frações silte e argila, por meio de decantação. As amostras das frações silte e areia, depois de secas, foram colocadas em porta-amostra especial, não orientadas e foram irradiadas no intervalo de 2 a 60° 20 num aparelho de raios-X, usando-se tubo de cobre e filtro de níquel. Amostras da fração argila desferrificada foram separadas em duas subfrações. Uma delas sofreu saturação por  $\text{K}^+$  (usando  $\text{KCl}$ ) em diversas lavagens e a outra subfração por  $\text{Mg}^{2+}$  (usando  $\text{MgCl}_2$ ).

Após a remoção do excesso de cloretos, as amostras saturadas por  $\text{K}^+$  e  $\text{Mg}^{2+}$  foram transferidas para lâminas de vidros, e orientadas por meio de esfregaço, e irradiadas por raios-X, no intervalo de 2 a 32° 20, também usando-se tubo de cobre com filtro de níquel. As amostras  $\text{K}^+$ -saturadas, após a irradiação, sofreram diversos tratamentos a 350 e 550°C e foram irradiadas no mesmo intervalo anterior. As amostras  $\text{Mg}^{2+}$  saturadas foram irradiadas no mesmo intervalo, porém, pré-tratadas com etileno glicol. Tais tratamentos foram necessários para auxiliar no reconhecimento dos diversos minerais da fração argila.

A identificação da goethita e hematita foi feita em amostras tratadas com NaOH 5M a quente por 1 hora (Kämpf & Schwertmann, 1982). Após o preparo, as amostras foram irradiadas com raios-X, usando tubo de cobre, e os minerais foram identificados principalmente pelos picos relativos a  $d_{012}$  e  $d_{110}$  respectivamente, hematita e goethita. A proporção desses minerais foi estimada de acordo com a método descrito por Schwertmann & Lathan (1986).

A determinação semiqualitativa da caulinata e gibbsita foi realizada pela análise térmica diferencial, usando curvas de calibração preparadas com padrões de misturas de caulinata e gibbsita (Dixon, 1966). Os outros minerais existentes na fração argila foram estimados percentualmente pela equação:  $[\text{Outros Minerais g kg}^{-1}] = 1.000 - (\text{caulinata} + \text{gibbsita} + \text{óxidos de ferro})$ , dentre os quais se encontram principalmente a vermiculita cloritizada, montmorilonita, traços de mica e material amorfo de sílica e alumina, dependendo do solo.

**Métodos estatísticos** - A base dos procedimentos estatísticos utilizados neste trabalho refere-se ao programa denominado Statistical Analysis System (SAS, 1989a,b). Foram selecionadas 13 faixas de comprimento de onda entre 400 e 2.500 nm, baseadas em dois critérios: a. nas faixas de reflectância em que a água, a matéria orgânica, ferro, caulinata e gibbsita causam absorção de energia; b. nas faixas que não possuem bandas de absorção, mas que são influenciadas pelos atributos dos solos em termos de intensidade (Figura 1). Para avaliação das equações múltiplas, foram utilizados, simultaneamente, os coeficientes  $R^2$  e  $C(p)$ . Quando  $C(p)$  for maior que o número de faixas espectrais selecionadas que participam da equação, ela pode ser considerada tendenciosa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização dos solos

Tanto a Terra Bruna Estruturada (TB) como o Latossolo Bruno (LB) são solos profundos, bem drenados, variando de Bruno-Escuros a Bruno, no horizonte superficial, a bruno forte, no horizonte B, muito argilos tanto na superfície como na subsuperfície (Quadro 1). O relevo da TB é ondulado a forte ondulado, enquanto o do LB é ondulado. As densidades de drenagem da TB e do LB estão na faixa de 8,4 e 3,6 respectivamente, posicionando-se entre a Terra Roxa Estruturada e o Brunizém Avermelhado (Demattê & Demétrio, 1996). Quimicamente, são solos predominantemente álicos e a saturação por bases é muito baixa para a TB e baixa para o LB (Quadro 2). O teor de matéria orgânica é elevado, na faixa de 50  $\text{g kg}^{-1}$ , e se deve às condições climáticas mais amenas, o que favorece sua acumulação (Buol et al., 1980).

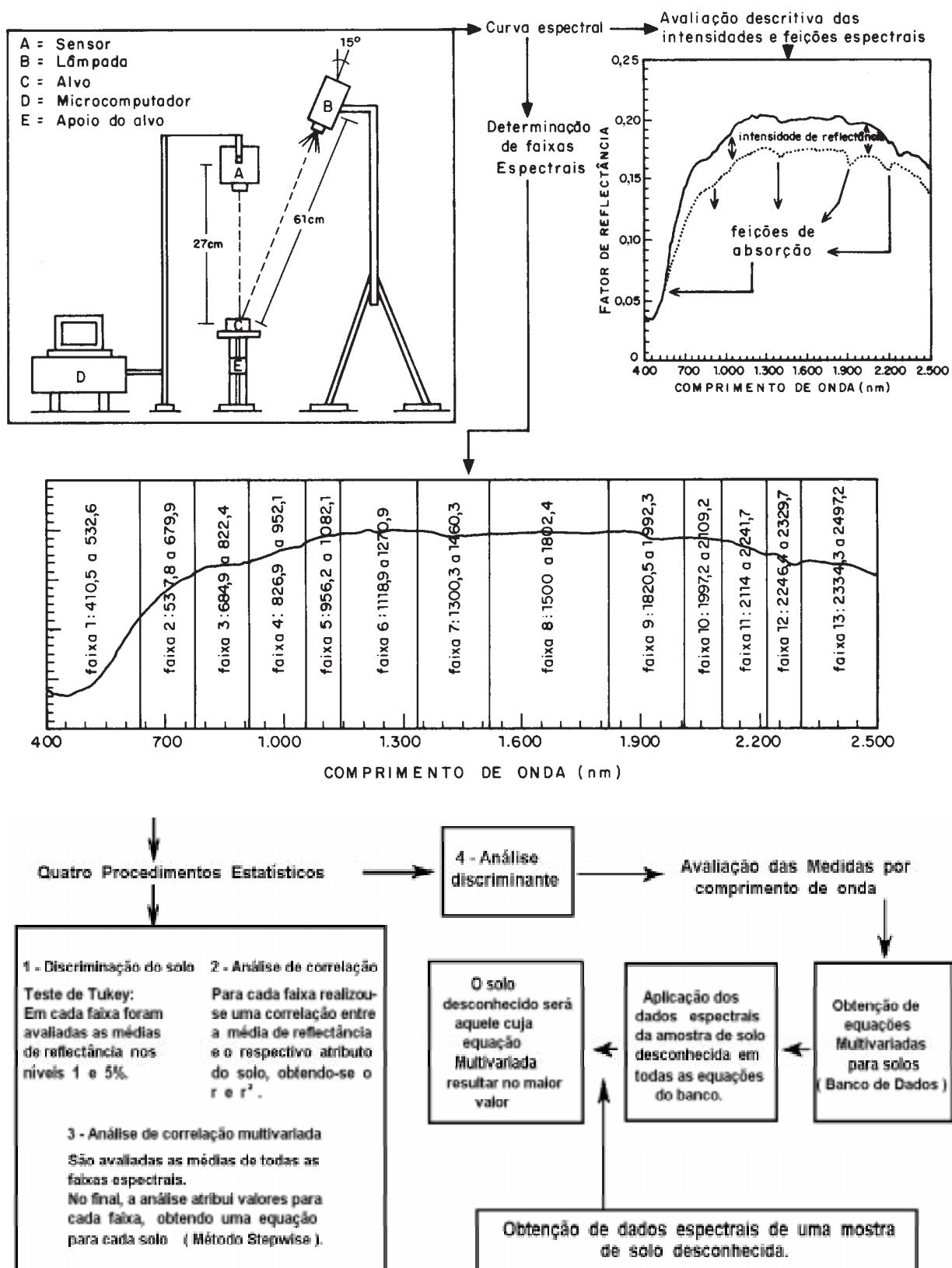


Figura 1. Fluxograma ilustrativo da obtenção e avaliação dos dados espetrais.

**Quadro 1. Resultados médios<sup>(1)</sup> das análises granulométricas, cor úmida, formas de ferro e matéria orgânica**

Profundidade	Granulometria				Cor <sup>(2)</sup> úmida dominante	Ferro				Matéria orgânica (ácidos) <sup>(6)</sup>					
	Areia	Silte	Argila	Silte/ argila x 100		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> total <sup>(3)</sup>	Amorfo <sup>(4)</sup>	Livre <sup>(5)</sup>	Amorfo/ livre x 100	Húmico (Pirofosfato Na)	Fúlvico (NaOH)	Húmico (Pirofosfato Na)	Fúlvico (NaOH)		
	cm					g kg <sup>-1</sup>					g kg <sup>-1</sup>				
<b>Latossolo Bruno</b>															
0-20	50	180	760	240	5YR 3/3	177	3,8	110,7	34	95,1	52,7	35,8	16,6		
40-60	40	140	820	180	2,5YR 3/4	178	3,7	109,1	34	-	-	-	-		
<b>Terra Bruna Estruturada</b>															
0-20	40	220	740	300	10YR 2/2	135	4,7	93,1	50	3,0	97,0	78,8	38,0		
40-60	50	180	770	230	10YR 3/4	125	4,4	84,8	51	-	-	-	-		

<sup>(1)</sup> 15 observações para a camada de 0-20 cm e cinco para a de 40-60 cm. <sup>(2)</sup> cor de acordo com Munsell Color Charts, Baltimore, Maryland, U.S.A., 1954. <sup>(3)</sup> Ferro total: extraído pelo ataque sulfúrico. <sup>(4)</sup> Ferro amorfo: extraído pelo oxalato de amônio. <sup>(5)</sup> Ferro livre: extraído pelo ditionito citrato bicarbonato de sódio, representado pelo ferro livre + ferro amorfo. <sup>(6)</sup> fracionamento químico da matéria orgânica. Os ácidos húmicos e fúlvicos foram avaliados pelos métodos do pirofosfato de Na e NaOH.

**Quadro 2. Resultados médios<sup>(1)</sup> das análises químicas e mineralógicas de amostras de solos**

Profundidade	MO <sup>(2)</sup>	Al	S <sup>(3)</sup>	CTC	V	Ki	Fração argila			Hematita <sup>(6)</sup>	Goethita <sup>(6)</sup>
							Óxidos de ferro <sup>(4)</sup>	Caulinita	Gibbsita		
							g kg <sup>-1</sup>	-mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	%	g kg <sup>-1</sup>	%
<b>Latossolo Bruno</b>											
0-20	52	10	46	156	30	1,1	145	480	280	95	28
40-60	29	4	2	85	22	1,1	133	460	320	87	35
<b>Terra Bruna Estruturada</b>											
0-20	53	32	14	206	7	1,5	126	630	60	184	20
40-60	19	18	5	104	5	1,4	110	630	50	210	25

<sup>(1)</sup> 15 observações para a camada de 0-20 cm e cinco para a de 40-60 cm. <sup>(2)</sup> matéria orgânica. <sup>(3)</sup> soma de bases. <sup>(4)</sup> extraído pelo DCB. <sup>(5)</sup> incluem-se principalmente: vermiculita cloritizada, poucas micas, material amorfo de Si e Al = 1000 - (caulinita + gibbsita + óxidos de ferro). <sup>(6)</sup> proporção de hematita e goethita no material concentrado com NaOH 5M.

Mineralogicamente, a TB é caulinítica, enquanto o LB, além desse mineral, tem na gibbsita um percentual razoável, na faixa de 300 g kg<sup>-1</sup> (Quadro 2). Além desses minerais, a difração de raios-X indicou a presença de vermiculita cloritizada e traços de mica e montmorilonita, estes para a TB. Os valores do Ki da TB são ligeiramente superiores aos do LB, indicando ser este solo mais intemperizado. O teor de ferro total está na faixa dos 177 g kg<sup>-1</sup> para o LB e 130 g kg<sup>-1</sup> para a TB (Quadro 1).

As análises de raios-X das frações silte e areia (dados não apresentados) indicaram dominância de quartzo para ambos os solos, porém com picos pouco intensos de plagioclásios identificados na fração silte da TB, assim como traços de minerais 2:1.

Em relação aos óxidos de ferro, há dominância de goethita, 69% para o LB e 80% para a TB (Quadro 2), valores estes compatíveis com os obtidos por Rodrigues (1984).

#### Interpretação dos espectros de reflectância

Observou-se que entre os solos TB e LB ocorreram diferenças na magnitude da reflectância e nas feições de absorção de energia eletromagnética em praticamente toda a faixa espectral estudada (Figura 2).

#### Cor

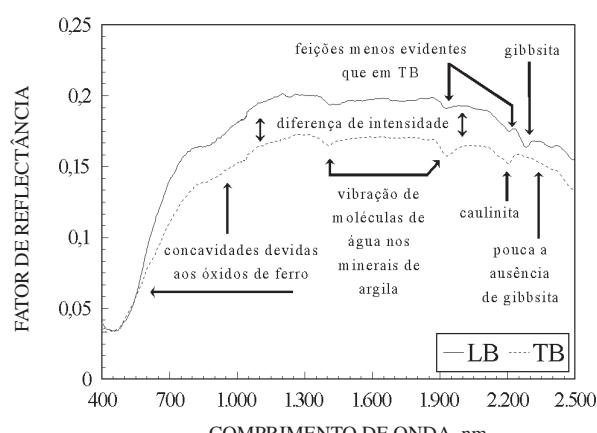
Para a cor úmida, o matiz da camada superficial é predominantemente 5YR para o LB e 10YR para a TB (Quadro 1), havendo aí maior contribuição do

amarelo no matiz. A TB apresenta tonalidade e intensidade com valor 2 na camada superficial, enquanto no LB é de 3. Na caracterização quantitativa da cor do solo, recomenda-se o uso da faixa do espectro óptico entre 380 e 720 nm (Kristof et al., 1980). Donzeli (1984) verificou que uma variação no matiz, como a aqui verificada, foi suficiente para diferenciar solos na região de Araras.

Em relação aos solos aqui estudados, notou-se que a intensidade da reflectância é maior no LB a partir dos 550 nm (Figura 2). Nesse caso, as diferenças observadas estão relacionadas com as propriedades de reflectância da matéria orgânica e óxidos de ferro (entre outros) que influenciam a cor. Por sinal, o matiz, valor e croma da cor apresentaram correlação significativa com a reflectância na faixa do visível (Quadro 5), concordando com regressões realizadas por Post et al. (1994).

### Matéria Orgânica

A região de Guarapuava, com clima úmido e frio, é propícia à acumulação da matéria orgânica. Os solos apresentaram teores de matéria orgânica semelhantes na primeira camada, sendo de 52 g kg<sup>-1</sup> para o LB (29 na segunda camada) e de 53 g kg<sup>-1</sup> (19 na segunda camada) para a TB (Quadro 2). Todavia, Henderson et al. (1992) mostraram que os constituintes da matéria orgânica também podem aumentar ou diminuir a intensidade de reflectância, como é o caso dos ácidos fúlvicos e húmicos, respectivamente. O fracionamento da matéria orgânica feito em amostras dos horizontes superficiais mostrou (Quadro 1) que os teores dos ácidos fúlvicos e húmicos extraídos com o pirofosfato de sódio não indicaram diferenças. Entretanto, a extração feita com o hidróxido de sódio revelou que a TB apresentou praticamente duas vezes mais ácidos fúlvicos e húmicos em relação ao LB.

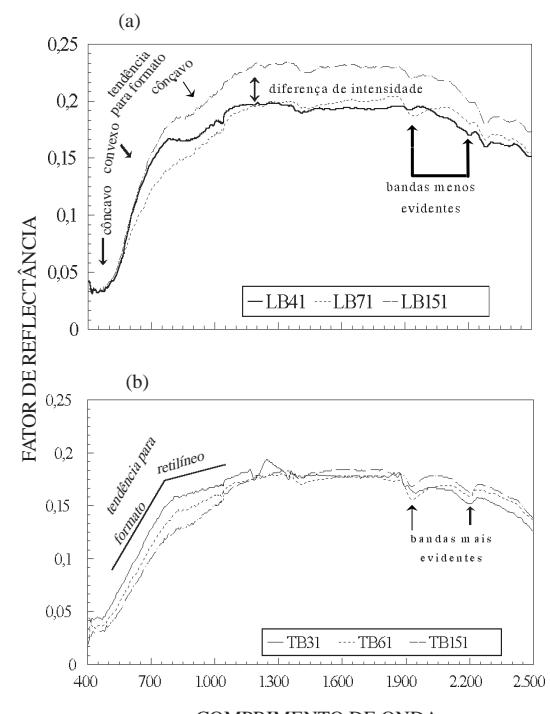


**Figura 2. Curvas espectrais médias da camada de 0-20 cm do Latossolo Bruno (LB); e da Terra Bruna Estruturada (TB).**

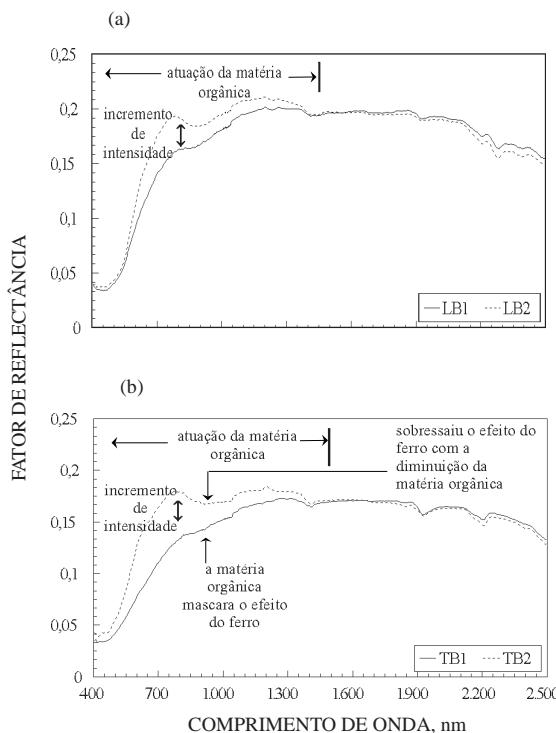
Por essa razão, os elementos que compõem a matéria orgânica podem ter contribuído nas diferenças de reflectância (Figura 2) entre 400 e 1.200 nm (faixa de atuação da matéria orgânica, de acordo com Mathews et al., 1973), concordando com Henderson et al. (1992).

Além disso, as curvas do LB apresentaram forma convexa-côncava-convexa na faixa entre 400 e 1.200 nm, mostrando que, apesar dos altos teores de matéria orgânica, o efeito do ferro ainda aparece na curva espectral (Figura 3a). Ao contrário, as amostras da TB, com menor teor de ferro em relação ao LB, apresentaram principalmente um formato retilíneo, indicando efeito maior da matéria orgânica (Figura 3b).

O aumento da reflectância na camada com menos matéria orgânica vai de 500 a 1.350 nm no LB e de 400 a 1.550 nm na TB (Figura 4), concordando com Mathews et al. (1973). O incremento da intensidade de reflectância da primeira para a segunda camada da TB, em comparação com o LB, deve-se ao menor teor de matéria orgânica desta segunda camada da TB. Além disso, sobressaiu o efeito do ferro, aumentando a concavidade e convexidade entre 400 e 1.200 nm.



**Figura 3. Curvas espectrais individuais de amostras do Latossolo Bruno (LB) e da Terra Bruna Estruturada (TB) da camada de 0-20 cm. Teores de argila (g kg<sup>-1</sup>): LB41 (76); LB71 (61); LB151 (78); TB31 (72); TB61 (71); TB151 (76).**



**Figura 4. Curvas espectrais médias: (a) LB, Latossolo Bruno, (b) TB, Terra Bruna Estruturada. Designações: LB1, TB1: amostras da profundidade de 0-20 cm; LB2, TB2: amostras da profundidade de 40-60 cm.**

### Granulometria

Outra característica a ser explorada para explicar os comportamentos espectrais de LB e TB na figura 2 é a textura, uma vez que o tamanho das partículas de minerais tende a influenciar a reflectância (Bowers & Hanks, 1965). Os solos apresentaram classe textural muito argilosa, LB com  $760 \text{ g kg}^{-1}$  e TB com  $740 \text{ g kg}^{-1}$  (Quadro 1), e, por essa razão, não deveria haver diferenças nas curvas de reflectância em virtude desse parâmetro. Entretanto, o LB contém percentual maior de argila fina, variação de 12 a 19% a mais, quando comparado com a TB (Quadro 3). Tal diferença poderia ser mais um fator a estar influenciando as diferenças espectrais desses solos. Isso, entretanto, deve ser considerado com cuidado uma vez que outros fatores associados à textura podem influir na reflectância.

As demais frações granulométricas também devem ser consideradas numa análise como esta. Os dois solos aqui estudados apresentam semelhança nos teores de areia, faixa de  $50 \text{ g kg}^{-1}$  para ambos os solos (Quadro 1) e, portanto, tal fração não deve ter influenciado as variações espectrais. O teor de silte, por sua vez, pode ter agido no comportamento das

**Quadro 3. Granulometria da fração argila de quatro amostras do Latossolo Bruno e da Terra Bruna Estruturada**

Repetição número	Argila total ( $< 2 \mu\text{m}$ )	Argila grossa ( $2 - 0,2 \mu\text{m}$ )	Argila fina ( $< 0,2 \mu\text{m}$ )
$\text{g kg}^{-1}$			
<b>Latossolo Bruno</b>			
1	780	400	380
2	790	430	360
3	810	420	390
4	750	340	410
<b>Terra Bruna Estruturada</b>			
1	780	590	190
2	820	580	240
3	740	470	270
4	730	510	220

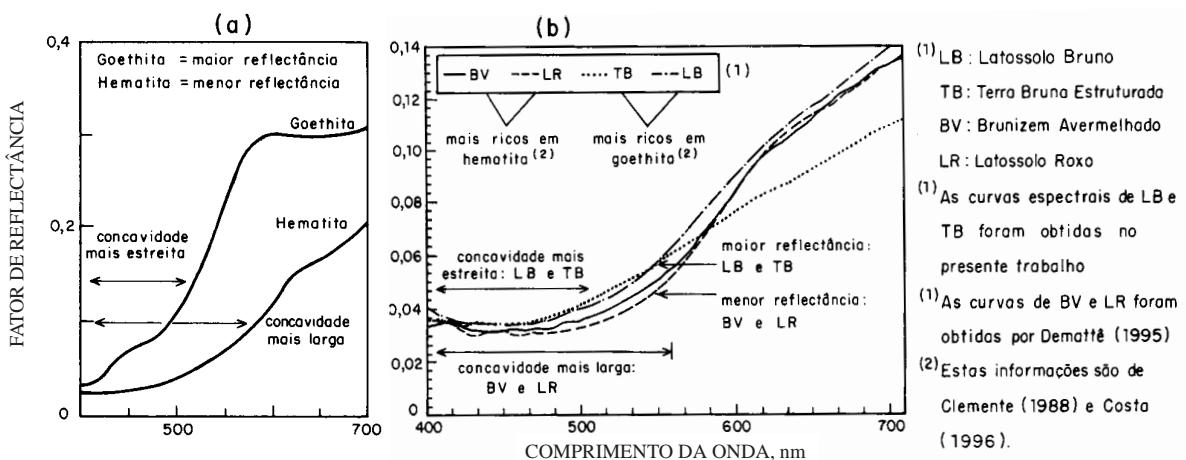
curvas espectrais, pois seus teores são distintos. Para Montgomery et al. (1972), tanto o teor de silte como a presença de minerais intemperizáveis nessa fração tiveram influência na reflectância espectral. As análises mineralógicas dessas frações feitas com difração de raios-X indicaram a presença dominante de quartzo, principalmente no LB com alguma contribuição também de caulinita e plagioclásio na TB. A maior concentração de quartzo pode ter influenciado o aumento da reflectância (Hunt & Salisbury, 1970) do LB (Figura 2) em todo o espectro óptico. Portanto, devem ser avaliados não só o teor de areia, silte ou argila, mas também os minerais constituintes.

### Mineralogia

A curva espectral da goethita apresenta uma concavidade mais estreita entre 400 e 600 nm quando comparada com a de hematita, além de absorver menos energia, figura 5a (Vitorello & Galvão, 1996). A figura 5b indica as curvas do LB e TB em comparação com as curvas de solos desenvolvidos de rocha básica estudados por Demattê (1995).

Os teores de goethita para ambos os solos (Quadro 2) estão na faixa dos 69 e 80%, respectivamente, LB e TB, para o horizonte superficial, e 64 e 73%, para o horizonte inferior. Tais resultados são superiores aos dos solos desenvolvidos de rochas básicas, que apresentam, de modo geral, teores de hematita superiores a 60% (Costa, 1996).

Assim sendo, a curva espectral indicada na figura 5b para os solos TB e LB apresenta uma concavidade na faixa de 400 a 500 nm mais estreita, quando comparada com as curvas dos solos desenvolvidos de rochas básicas incluídos para comparação neste estudo. Além disso, os solos ricos



Observação: As curvas da hematita e da goethita foram extraídas de Vitorello & Galvão (1996), com exceção das legendas.

**Figura 5. Avaliação das curvas da hematita e da goethita e sua relação com as curvas espectrais dos solos.**

em goethita evidenciam intensidade de reflectância maior que os hematíticos entre 400 e 570 nm, concordando parcialmente com Kosmas et al. (1984), para os quais a hematita absorve mais energia que a goethita entre 380 e 800 nm. Tudo indica, portanto, que, nesta faixapectral, as alterações nas curvas espectrais tenham a influência em razão do maior predomínio da goethita.

Contudo, além desses minerais, as formas de ferro, no caso o ferro amorfó, também podem influenciar a intensidade de reflectância, conforme relatado por Karmanova (1981). Considerando que o LB apresenta teor de ferro extraído pelo ataque sulfúrico de 177 g kg<sup>-1</sup>, maior que o da TB com 135 g kg<sup>-1</sup>, era para haver maior absorção de energia pelo LB, o que não ocorreu na faixapectral entre 400 e 1.200 nm (Figura 2). Portanto, considerando que a quantidade Fe-amorfó aumenta do LB (3,8 g kg<sup>-1</sup>) para a TB (4,7 g kg<sup>-1</sup>) (Quadro 1), provavelmente esta forma de ferro seja mais um fator a interferir na diferença da reflectância.

Em relação às bandas de absorção, notou-se que o teor de "outros minerais" decresce na sequência TB (184 g kg<sup>-1</sup>) para LB (95 g kg<sup>-1</sup>), como também o teor de caulinita passa de 630 g kg<sup>-1</sup> para 480 g kg<sup>-1</sup>. A gibbsita ocorre principalmente no LB, solo mais intemperizado com valor médio de 280 g kg<sup>-1</sup> (Quadro 2). Essas diferenças influíram na reflectância spectral e estão ilustradas nas figuras 2 e 3.

Os resultados difratométricos na TB mostraram dominância de caulinita, ocorrendo também a vermiculita-cloritizada (mineral com espaçamento de 14 Å e pouco expansivo) e traços de montmorilonita e mica. A gibbsita foi identificada, porém em pouca quantidade. A vermiculita cloritizada absorve menos água do que a montmorilonita e mais água do que as micas (minerais 2:1 com 10 Å), como observado

por Barnhisel (1977). Portanto, as feições de absorção nas curvas de reflectância da TB em 1.400 nm com absorção fraca em 2.200 nm com absorção moderada devem-se à presença da hidroxila estrutural da caulinita, de acordo com Mathews et al. (1973). Considerando que a análise de raios-X identificou a presença da vermiculita-cloritizada e traços de minerais 2:1, provavelmente as feições em 1.400 nm e 1.920 nm, absorção moderada e forte, devem-se às vibrações dos grupos OH e das moléculas de água adsorvidos nesses minerais (Figuras 2 e 3).

No LB, as faixas de absorção da caulinita são menos evidentes (Figuras 2 e 3) do que na TB, porém a absorção em 2.265 nm indica a presença de gibbsita (Madeira Netto, 1996), mas não na TB, confirmado pela análise de raios-X e análise térmica diferencial, sendo, portanto, o principal fator de diferenciação com a curva espectral da TB.

#### Correlação estatística entre dados espectrais e analíticos de solos para as amostras de camada superficial

As correlações entre os atributos do solo e a curva espectral podem ocorrer em determinada faixa ou num conjunto de faixas, assim como em níveis de significância variáveis. Tal fato se deve à influência dos atributos do solo ao longo da curva espectral (Coleman et al., 1991). No caso do LB, o cálcio teve a melhor correlação na faixa 1 (Quadro 4) mas também teve significância a 5% nas faixas 5, 6, 7, 11 e 12 (dados não apresentados).

Os parâmetros "soma de bases" e "saturação por bases" e os elementos cálcio, magnésio e potássio apresentaram correlação positiva para o LB (Quadro 4). Tais resultados vêm de encontro às observações de Dematté et al. (1998). Tais autores verificaram um aumento na intensidade de

reflectância em quase todo o espectro óptico, em função do aumento do teor de cálcio nos solos desenvolvidos de rochas ácidas. Neste caso, o LB apresentou maior teor de bases, na faixa de  $46 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , assim como maior variação, contra  $14 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$  para a TB (Quadro 2), sugerindo que, a partir de determinado nível, o teor de bases age nesta faixa espectral. Nesse caso, o maior teor de bases trocáveis no LB corresponde a mais um fator que pode ter contribuído na diferença da magnitude espectral desses solos.

A correlação de determinado atributo do solo como o fósforo, com significância a 1% para o LB e ausência de correlação na TB, pode ser devida aos níveis de valores encontrados para cada solo

(Coleman et al., 1991). Outro ponto a ser considerado refere-se à variação das faixas espetrais de determinado atributo em relação aos diferentes solos. Assim é o caso do potássio, com correlação significativa a 1% para ambos os solos na faixa 12 para o LB e na faixa 5 para a TB. Tais resultados evidenciam que os solos possuem características próprias, e daí a possibilidade de terem para um mesmo atributo faixas diferenciadas de correlação com a reflectância.

Quando se examinam os dados estatísticos envolvendo os dois solos em conjunto (Quadro 5), o número de observações aumenta para 30. Dos 23 parâmetros analisados, 16 tiveram significância a 1% e 7 parâmetros a 5% em pelo menos uma faixa espectral.

**Quadro 4. Faixas de comprimento de onda que apresentaram coeficientes de correlação mais elevados com os atributos<sup>(1)</sup> dos solos (As amostras do Latossolo Bruno e da Terra Bruna Estruturada foram consideradas individualmente)**

Latossolo Bruno (n: 15)			Terra Bruna Estruturada (n: 15)		
Atributo	r	Faixa <sup>(2)</sup>	Atributo	r	Faixa <sup>(2)</sup>
Fósforo	0,780	12*	Matiz	-0,750	9**
V	0,673	1**	Potássio	0,738	5**
Cálcio	0,618	1*	M.O.	0,661	13**
SB	0,590	1*	Valor	0,607	1*
Valor	0,590	2*	Fe-amorfo/Fe-livre	0,588	5*
CTC efetiva	0,531	1*			
Magnésio	0,529	1*			
CTC <sub>1</sub>	-0,519	2*			
Croma	0,509	3*			
Potássio	0,585	12**			

<sup>(1)</sup> Siglas: V: saturação por bases; SB: soma de bases; m.o.: matéria orgânica; Fe-am.: ferro amorfo extraído pelo oxalato; Fe-liv.: extraído pelo ditionito citrato bicarbonato de sódio. Representa o ferro livre + ferro amorfo; CTC<sub>1</sub>: capacidade de troca de cátions do solo; n: número de observações. <sup>(2)</sup> Faixa 1, 2...13: faixas de comprimento de onda selecionadas; \*, \*\* : significância a 5 e 1%, respectivamente.

**Quadro 5. Faixas de comprimento de onda e coeficientes de correlação mais elevados com os atributos<sup>(1)</sup> dos solos (Análise estatística usando dados dos dois solos em conjunto, n: 30<sup>(2)</sup>)**

Atributo	r	Faixa <sup>(3)</sup>	Atributo	r	Faixa <sup>(3)</sup>
CTC <sub>1</sub>	-0,721	3**	CTC <sub>2</sub>	-0,556	3**
Matiz	-0,706	3**	Fe-amorfo/livre	-0,544	3**
Fe-total	0,651	3**	Valor	0,529	2**
V	0,642	5**	Ki	-0,521	3*
Croma	0,631	3**	Cálcio	0,519	5**
Gibbsita	0,620	3*	Outros minerais	-0,517	3**
Caulinita	-0,607	3**	Silte	-0,456	9*
Fósforo	0,586	5**	Fe-amorfo	-0,440	3*
Potássio	0,571	8**	CTC efetiva	0,412	11*
SB	0,557	6**	Silte/argila	-0,386	2*
Magnésio	0,557	6**	M.O.	-0,362	1*
Fe-livre	0,557	3**			

Siglas: V: saturação por bases; SB: soma de bases; m.o.: matéria orgânica; Fe-am.: ferro amorfo extraído pelo oxalato; Fe-liv.: extraído pelo ditionito citrato bicarbonato de sódio. Representa o ferro livre + ferro amorfo; CTC<sub>1</sub>: capacidade de troca de cátions do solo; CTC<sub>2</sub>: capacidade de troca de cátions da argila; outros minerais: incluem-se principalmente a vermiculita cloritizada, poucas micas, material amorfo de Si e Al; <sup>(2)</sup> número de observações; <sup>(3)</sup> faixa 1, 2...13: faixas de comprimento de onda selecionadas; \*, \*\* : significância a 5 e 1%, respectivamente.

A correlação da gibbsita (faixa 3) indica que na medida em que aumenta o seu teor no solo aumenta a intensidade de reflectância. No caso dos perfis do LB, a variação deste mineral vai de 150 a 450 g kg<sup>-1</sup> enquanto na TB vai de 40 a 100 g kg<sup>-1</sup> (dados não apresentados). Madeira Netto (1996) obteve correlação significativa entre a intensidade da banda de absorção da gibbsita e a concentração deste mineral. Tal resultado obtido para a gibbsita não deixa de ser animador, pois pode auxiliar na seleção de bandas do espectro para possíveis estudos de previsão das variáveis dos solos, como aliás tem sido feito por Coleman & Montgomery (1987).

O matiz, valor e chroma apresentaram significância a 1% nas faixas de um a três correspondentes ao visível do espectro eletromagnético, dados estes semelhantes aos obtidos por Mathews et al. (1973), concordando com Kristof et al. (1980).

Quanto à matéria orgânica, com correlação negativa na faixa um, os resultados são concordantes com os obtidos por Coleman & Montgomery (1987) que trabalharam com Alfisols e Vertisols.

#### **Discriminação e caracterização espectral de solos**

Os dois solos foram discriminados estatisticamente nas faixas 3 a 13 (entre 684 e 2.500 nm) com significância a 1%, não tendo as faixas 1 e 2 (entre 410 e 679 nm) contribuído para a diferenciação dos solos.

Com o objetivo de desenvolver e testar métodos para a determinação do tipo de solo e sua separabilidade, foram realizadas análises discriminantes a partir de dados espetrais ou de dados analíticos. Para tanto, foram obtidas equações discriminantes (Quadro 6) com os dados espetrais para caracterizar

os solos. Pressupondo o conhecimento das reflectâncias médias por faixa de comprimento de onda de um desses dois tipos de solos sem que se saiba qual é o solo, esses dados devem ser aplicados nas equações dos dois solos. Aquela que resultar em maior valor, terá maior probabilidade de representar o solo desconhecido (Figura 1). Tanto pelos dados analíticos dos solos, como pela reflectância espectral, essas equações foram testadas apresentando 100% de eficiência de classificação, mesmo apresentando semelhanças nos teores de matéria orgânica, textura e ferro. Coleman et al. (1991) chegaram a obter erros de até 55,6%, provavelmente pela heterogeneidade da amostragem para um mesmo solo.

#### **Previsão dos atributos dos solos pela sua energia refletida**

As estimativas das características dos solos por meio dos dados espetrais para os mais diversos usos não deixam de ser importante ferramenta de trabalho de aplicação do sensoriamento remoto, como já evidenciaram Coleman & Montgomery (1987); Coleman et al. (1991) e Dematté & Garcia (1999) por meio de modelos estatísticos.

Os dados do quadro 7 resumem as seleções das melhores combinações de faixas do espectro óptico para obtenção das equações de acordo com as características dos solos. Assim, o teor de fósforo pode ser estimado através das faixas espetrais 7, 11 e 12 com R<sup>2</sup> de 0,76, porém com C(p) igual a 77, maior que o número de bandas usadas na equação, indicando tendenciosidade. O melhor resultado foi para a previsão da matéria orgânica na TB que apresentou R<sup>2</sup> de 0,92 significância a 1% e com baixo C(p). O R<sup>2</sup> médio para todas as equações foi de 0,49,

**Quadro 6. Equações lineares discriminantes em função da reflectância e os respectivos testes de discriminância**

Solo <sup>(1)</sup>	Equação linear discriminante <sup>(2)</sup>			
Latossolo Bruno	-139,11 + 370F <sub>1</sub> - 1032F <sub>2</sub> - 836,99F <sub>3</sub> + 575,24F <sub>4</sub> + 1142F <sub>5</sub> + 2626F <sub>6</sub> - 717,74F <sub>7</sub> - 2394F <sub>8</sub> + 949,61F <sub>9</sub> - 1478F <sub>10</sub> - 1147F <sub>11</sub> - 1326F <sub>12</sub> + 4135F <sub>13</sub>			
Terra Bruna Estruturada	-132,15 + 3347F <sub>1</sub> - 810,71F <sub>2</sub> - 2525F <sub>3</sub> + 2800F <sub>4</sub> + 497,69F <sub>5</sub> + 1935F <sub>6</sub> + 1752F <sub>7</sub> - 4325F <sub>8</sub> - 250,21F <sub>9</sub> + 772,94F <sub>10</sub> - 3573F <sub>11</sub> + 1297F <sub>12</sub> + 2939F <sub>13</sub>			
<b>Resultados da classificação, %</b>				
	Dados espetrais	Dados analíticos		
	Acerto	Erro	Acerto	Erro
Latossolo Bruno	100,0	0,0	100,0	0,0
Terra Bruna Estruturada	100,0	0,0	100,0	0,0

<sup>(1)</sup> 15 observações para cada solo. <sup>(2)</sup> F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, F<sub>3</sub>...F<sub>13</sub>; faixas de comprimento de onda selecionadas.

**Quadro 7. Equações lineares múltiplas relacionando os atributos<sup>(1)</sup> dos solos com a reflectância média de bandas espectrais selecionadas para os dois tipos de solos (Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada)**

Atributo	Equação de regressão <sup>(2)</sup>	R <sup>2</sup>	C(p)
<b>Latossolo Bruno (n:15)</b>			
Cálcio	$\hat{Y} = 10(24,55 + 706,96F_1)$	0,382*	-0,11
Croma	$\hat{Y} = 5,42 - 360,81F_1 + 85,37F_3$	0,454*	-4,27
CTC1	$\hat{Y} = 10(30,61 - 158,24F_2)$	0,269*	267,07
CTC efetiva	$\hat{Y} = 10(29,93 + 925,90F_1)$	0,281*	2,26
Potássio	$\hat{Y} = 10(-0,33 + 21,67F_{12} - 19,51F_{13})$	0,524*	303,75
Fósforo	$\hat{Y} = -65,70 + 383,64F_7 - 1264,23F_{11} + 1330,11F_{12}$	0,758**	77,05
Magnésio	$\hat{Y} = 10(-15,51 + 454,48F_1)$	0,280*	7,44
SB	$\hat{Y} = 10(-40,30 + 1171,37F_1)$	0,343*	2,51
V	$\hat{Y} = -284,58 + 8215,29F_1$	0,453**	4,12
Valor	$\hat{Y} = -1,07 + 67,24F_2 - 38,81F_7 + 35,20F_{13}$	0,601*	-2,54
<b>Terra Bruna Estruturada (n:15)</b>			
Fe-amorfo/Fe-livre	$\hat{Y} = 23,10 + 178,60F_5$	0,346*	8,58
Potássio	$\hat{Y} = 10(-0,16 + 1,70F_5)$	0,545**	6,02
Matiz	$\hat{Y} = 6,57 - 9,99F_9$	0,562**	236,46
Matéria orgânica	$\hat{Y} = 10(1,56 - 15,30F_5 + 121,48F_{10} - 308,27F_{12} + 237,40F_{13})$	0,921**	0,79
Valor	$\hat{Y} = 2,97 + 94,91F_1 - 20,09F_6$	0,724**	19,48

<sup>(1)</sup> Siglas: SB: soma de bases; Fe-am.: ferro extraído pelo oxalato; Fe-liv.: extraído pelo ditionito citrato bicarbonato de sódio. Representa o ferro livre + ferro amorfo; CTC<sub>1</sub>: capacidade de troca de cátions do solo; <sup>(2)</sup> F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>...F<sub>13</sub>: faixas de comprimento de onda selecionadas; n: número de observações; \*, \*\* : significância a 5 e 1%, respectivamente.

**Quadro 8. Equações lineares múltiplas relacionando os atributos<sup>(1)</sup> dos solos e a reflectância média de bandas espectrais selecionadas para os dois tipos de solos (Latossolo Bruno e Terra Bruna Estruturada), considerados conjuntamente**

Atributo	Equação de regressão <sup>(2)</sup>	R <sup>2</sup>	C(p)
Cálcio	$\hat{Y} = 10(-7,26 + 53,17F_5)$	0,270**	-7,16
Caulinita	$\hat{Y} = 10(67,15 + 895,15F_1 - 331,77F_3)$	0,503**	21,27
Croma	$\hat{Y} = -3,01 - 236,55F_2 + 218,67F_3 - 104,83F_9 + 104,73F_{13}$	0,732**	-2,65
CTC1	$\hat{Y} = 10(28,02 - 106,85F_3 + 333,77F_{12} - 319,92F_{13})$	0,642**	-1,58
CTC2	$\hat{Y} = 10(14,12 + 285,39F_1 - 133,40F_3)$	0,372**	-4,45
CTC efetiva	$\hat{Y} = 10(-4,82 + 58,62F_{11})$	0,170*	-6,98
Fe-amorfo/Fe-livre	$\hat{Y} = 27,52 + 2358,79F_1 - 1694,70F_2 + 520,34F_3$	0,664**	15,58
Fe-total	$\hat{Y} = 10(15,08 - 425,00F_1 + 193,40F_2)$	0,691**	12,99
Fe-livre	$\hat{Y} = 10(10410 - 193750F_1 + 83150F_2)$	0,576**	7,13
Fe-amorfo	$\hat{Y} = 10(364,51 + 10032,02F_{12} - 10167,97F_{13})$	0,591**	8,32
Gibbsita	$\hat{Y} = 10(-10,71 + 916,92F_1 - 2649,09F_{12} + 2741,67F_{13})$	0,706**	2,27
Potássio	$\hat{Y} = 10(-0,11 + 1,25F_8)$	0,326**	-3,80
Fósforo	$\hat{Y} = -14,58 + 108,92F_5$	0,343**	4,42
Ki	$\hat{Y} = 1,66 - 23,14F_3 + 18,32F_4$	0,392**	7,22
Matiz	$\hat{Y} = 5,07 + 167,11F_1 - 86,51F_2$	0,704**	65,70
Magnésio	$\hat{Y} = 10(-5,95 + 38,43F_6)$	0,311**	-3,82
Matéria orgânica	$\hat{Y} = 10(5,57 - 47,68F_1 - 16,78F_5 + 26,83F_{12})$	0,377**	5,82
Outros minerais	$\hat{Y} = 10(37,51 - 536,30F_3 + 414,05F_4)$	0,365**	0,54
SB	$\hat{Y} = 10(-13,11 + 87,34F_6)$	0,300**	-6,32
Silte/argila	$\hat{Y} = 45,24 - 129,21F_3$	0,154*	2,14
Silte	$\hat{Y} = 10(28,12 + 432,27F_8 - 486,53F_9)$	0,337**	1,83
V	$\hat{Y} = -102,90 + 718,08F_5$	0,413**	-4,51
Valor	$\hat{Y} = 1,73 + 87,20F_4 - 70,25F_5$	0,586**	-4,77

<sup>(1)</sup> Siglas: SB: soma de bases; Fe-am.: ferro amorfo extraído pelo oxalato; Fe-liv.: extraído pelo ditionito citrato bicarbonato de sódio. Representa o ferro livre + ferro amorfo; CTC<sub>1</sub>: capacidade de troca de cátions do solo; CTC<sub>2</sub>: capacidade de troca de cátions da argila; outros minerais: incluem-se principalmente a vermiculita cloritizada, poucas micas, material amorfo de Si e Al. <sup>(2)</sup> F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>...F<sub>13</sub>: faixas de comprimento de onda selecionadas; \*, \*\* : significância a 5 e 1%, respectivamente.

o que não tem diferido muito de outros pesquisadores (Coleman et al., 1991).

Analizando o quadro 6, observa-se que toda a porção do espectro óptico usado foi significativa na determinação das variáveis do solo. Quando foram utilizados dados de todos os solos (Quadro 8), 21 dos 23 atributos obtiveram significância a 1%; e 2 a 5% com  $R^2$  médio de 0,48. Com o aumento do número de observações para 30, surgiram atributos com melhores  $R^2$  e C(p), tais como o croma, gibbsita e a CTC do solo. Aliás, a gibbsita apresentou um  $R^2$  de 0,70 com C(p) de 2,27, concordando com Madeira Netto (1996) sobre a possibilidade de quantificação desse mineral por meio da reflectância. Apenas para comparação, Coleman et al. (1991) apresentaram  $R^2$  máximos de 0,68.

É necessário, entretanto, enfatizar o fato de que tais equações, como muitos outros modelos de previsão, são geograficamente dependentes, podendo ou não ser aplicadas em outras áreas. Para isso, há necessidade de mais pesquisas e observar até que ponto ou em que condições tais modelos se aplicam.

## CONCLUSÕES

1. Ocorreram diferenças nas intensidades e feições espectrais entre os dois solos, atribuídas, principalmente, às diferenças dos minerais constituintes das frações areia, silte e argila, dos óxidos de ferro hematita e goethita e ferro amorfo.

2. A reflectância da camada subsuperficial dos solos apresentou maior intensidade em relação à camada superficial entre 500 e 1.550 nm do espectro eletromagnético, devidos à influência da matéria orgânica.

3. A análise discriminante foi 100% eficiente na separação dos dois solos por meio dos dados espectrais.

4. A gibbsita, a matéria orgânica, a CTC, a tonalidade e a intensidade da cor apresentaram equações múltiplas com coeficientes de correlação mais elevados para sua previsão quantitativa.

## AGRADECIMENTO

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Departamento de Sensoriamento Remoto (SERE), localizado em São José dos Campos, pela utilização do espectrorradiômetro IRIS, sem o qual não seria possível a realização deste trabalho.

## LITERATURA CITADA

- BARNHISEL, R.I. Chlorites and hydroxy interlayered vermiculite and smectite. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. Minerals in soil environments. Madison, SSSA, 1977. p.331-56.
- BOWERS, S.A. & HANKS, R.J. Reflectance of radiant energy from soils. *Soil Sci.*, 100:130-138, 1965.
- BUOL, S.; HOLE, F.D. & MC CACKEM, R.F. Soil genesis and classification. Ames, The Iowa University Press, 1980. 4040p.
- 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 Agronômico de Campinas, 1986. 94p. Boletim Técnico, 106.
- CLEMENTE, C.A. Alterações e solos desenvolvidos sobre rochas vulcânicas ácidas da formação Serra Geral nos Planaltos de Guarapuava e Palmas, Região Centro Sul do Estado do Paraná. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, 1988. 211p. (Tese de Doutorado)
- 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. *Photogram. Eng. Rem. Sens.*, 53:1659-1663, 1987.
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A.; MONTGOMERY, O.L.; GAOT, T. & PRASAD, S. Spectral band selection for quantifying selected properties in highly weathered soils. *Soil Sci.*, 151:355-361, 1991.
- COLEMAN, T.L.; AGBU, P.A. & MONTGOMERY, O.L. Spectral differentiation of soils and soil properties: is it possible from space platforms? *Soil Sci.*, 155:283-293, 1993.
- COSTA, A.C. Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná river basin, Brazil. Columbus, Ohio State University, 1996. 243p. (Tese de Doutorado)
- DABIN, B. Etude d'une méthode d'extraction de la matière humique du sol. *Sci. Sol.*, 1:47-63, 1971.
- DEMATTÉ, 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. 265p. (Tese de Doutorado).
- DEMATTÉ, J.A.M. & DEMÉTRIO, V.A. Padrões de drenagem em áreas de solos desenvolvidos de rochas vulcânicas ácidas na região de Guarapuava (PR). *R. Bras. Ci. Solo*, 20:305-311, 1996.
- DEMATTÉ, J.A.M.; GARCIA, G.J. & PROCHNOW, L.I. Variações induzidas de atributos químicos e sua influência na reflectância espectral de três solos do estado do Paraná. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:479-490, 1998.
- DEMATTÉ, J.A.M. & GARCIA, G.J. Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:237-342, 1999.
- DIXON, J.B. Quantitative analysis of kaolinite and gibbsite in soils by differential thermal and selective dissolution methods. In: CLAYS AND CLAY MINERALS CONFERENCE, 14., New York, 1966. Proceedings. New York, Pergamon Press, 1966. p.82-89.
- DONZELI, P.L. Comportamento espectral de três latossolos argilosos da região de Limeira - Araras - SP em relação às suas propriedades físicas e químicas. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1984. 149p. (Tese de Doutorado).

- 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, 57)
- 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 Pesquisas Espaciais, 1992. 131p.
- FORMAGGIO, A.R. Comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de laboratório. São José dos Campos, INPE, 1983. 90p. (Tese de Mestrado)
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.E.; VALERIANO, M.M. & OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo; 20:467-474, 1996.
- HENDERSON, T.L.; BAUMGARDNER, M.F.; FRANZMEIER, D.P.; STOTT, D.E. & COSTER, D.C. High dimensional reflectance analysis of soil organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J., 56:865-872, 1992.
- HOLMGREN, G.S. A rapid citrate-dithionite extractable iron procedure. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 31:210-211, 1967.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and infrared spectra of minerals and rocks: II. Carbona. Modern Geol., 2:23-30, 1970.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis: advanced course. Madison, Wisconsin University, 1969. 895p.
- KÄMPF, N. & SCHWERTMANN, U. The 5M NaOH concentration method for iron oxides in soils. Clays Clay Miner., 30:401-408, 1982.
- KARMANOVA, L.A. Effect of various iron components on the spectral reflectance and color of soils. Sov. Soil Sci., 13:53-60, 1981.
- KOSMAS, C.S.; CURI, N.; BRYANT, R.B. & FRANZMEIER, D.P. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. Soil Sci. Soc. Am. J., 48:401-405, 1984.
- KRISTOF, S.J.; BAUMGARDNER, M.F.; WEISMILLER, R.A. & DAVIS, S. Application of multiespectral reflectance studies of soils: Pre-LANDSAT. In: SYMPOSIUM MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA, 6., West Lafayette, 1980. Proceedings. West Lafayette, 1980. v.2. p.52-61.
- McKEAGNE, J.A. & DAY, J.H. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various class of soils. Can. J. Soil Sci., 46:13-22, 1966.
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. Photo Interpret., 34:59-72, 1996.
- 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.; BAUMGARDNER, M.F. & WEISMILLER, W.A. An investigation of the relationship between spectral reflectance and chemical, physical and genetic characteristics of soils. West Lafayette, Purdue University, 1972. (LARS. Information note, 082776)
- POST, D.F.; HORVATH, E.H.; LUCAS, W.M.; WHITE, S.A.; EHASZ, M.F. & BATAHILY, A.K. Relations between soil color and LANDSAT reflectance on semiarid Rangelands. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1809-16, 1994.
- RAIJ, B. van. & QUAGGIO, J.A. Métodos de análise do solo para fins de fertilidade. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1983. 40p. (Boletim técnico, nº 81)
- RODRIGUES, T.E. Caracterização e gênese de solos brunos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MG). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1984. 255p. (Tese de Doutorado)
- SAS. Statistical Analysis System Institute. SAS/STAT<sup>r</sup> User's guide, version 6, 4.ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989a. v.1. 943p.
- SAS. Statistical Analysis System Institute. SAS/STAT<sup>r</sup> User's guide, version 6, 4.ed. Cary, NC: SAS Institute Inc., 1989b. v.2. 846p.
- SCHWERTMANN, U. & LATHAN, M. Properties of iron oxides in some New Caledonian Oxisols. Geoderma, 39:10-123, 1986.
- STONER, E.R. & BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in reflectance of surface soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:1161-1165, 1981.
- VITORELLO, I. & GALVÃO, L.S. Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. Photo Interpret., 34:77-99, 1996.