



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

DEMATTÊ, J. A. M.; FOCHT, D.
DETECÇÃO DE SOLOS ERODIDOS PELA AVALIAÇÃO DE DADOS ESPECTRAIS
Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 23, núm. 2, 1999, pp. 401-413
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180218287024>

- 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

DETECÇÃO DE SOLOS ERODIDOS PELA AVALIAÇÃO DE DADOS ESPECTRAIS⁽¹⁾

J. A. M. DEMATTÉ⁽²⁾ & D. FOCHT⁽³⁾

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da reflectância espectral na discriminação e diagnóstico de diferentes níveis de erosão. Para tanto, quatro perfis de solos (Latossolo Vermelho-Amarelo, Terra Roxa Estruturada latossólica, Cambissolo de basalto e Vertissolo), localizados numa topossecuência na região de Piracicaba, São Paulo, Brasil, foram submetidos à avaliação de atributos químicos, físicos e mineralógicos para verificar sua influência na reflectância. Os dados espectrais foram coletados, utilizando espetrorradiômetro no intervalo de 400 a 2.500 nm, em laboratório. O processo erosivo dos solos foi considerado de acordo com as profundidades de coleta de amostras no perfil, sendo: 0-5, 10-20, 40-60 e 60-80 cm, correspondentes à erosão nula (testemunha), erosão ligeira, erosão moderada e erosão severa, respectivamente. Com os dados espectrais obtidos em laboratório, foram também simuladas respostas do TM-LANDSAT-5, relacionando-os com os atributos do solo e os níveis de erosão. Na medida em que aumentou o grau de erosão, ocorreram alterações, principalmente no teor de matéria orgânica, provocando modificações no caráter espectral. Quanto mais erodido foi o solo, maior a intensidade da curva espectral entre 600 e 2.400 nm. As bandas de absorção devidas aos óxidos de ferro (850 nm), água (1.400 e 1.900 nm) e caulinita (2.200 nm), por sua vez, apresentaram-se mais intensas nos solos erodidos. Os dados espectrais do LANDSAT mostraram-se menos detalhados e, por consequência, menos eficientes na detecção dos níveis de erosão. Apesar disso, as bandas 3, 4, 5 e 7 discriminaram os solos não erodidos dos erodidos por meio da intensidade e tendência das curvas.

Termos de indexação: sensoriamento remoto, erosão, radiometria.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em dezembro de 1997 e aprovado em dezembro de 1998.

⁽²⁾ Professor Doutor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ/USP. Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: jamdemat@carpa.ciagri.usp.br.

⁽³⁾ Pós-Graduanda do curso de Solos e Nutrição de Plantas, ESALQ/USP. E-mail: dfocht@carpa.ciagri.usp.br

SUMMARY: DETECTION OF SOIL EROSION BY SPECTRAL REFLECTANCE

*The objective of this work was to evaluate the efficiency of spectral reflectance in the detection of different erosion levels present in soils. Four soils, corresponding to a Red-Yellow Latosol (*Oxisol*), Latosolic Terra Roxa Estruturada (*Ultisol*), Cambisol (*Inceptisol*) and Vertisol, located in a toposequence in Piracicaba, São Paulo, Brazil, were evaluated for their chemical, physical and mineralogical attributes. The spectral reflectance was measured between 400 and 2,500 nm using an Infra Red Intelligent Spectroradiometer. Each soil was collected according to the depth-increments 0-5, 10-20, 40-60, 60-80 cm, which were considered as no erosion (control), slight erosion, moderate erosion and severe erosion, respectively. Spectral data obtained under laboratory conditions, which simulated data from the TM-LANDSAT-5 satellite, were then correlated with the soil erosion process. As the degree of simulated erosion increased, alterations in the soils occurred, mainly with the organic matter content, causing modifications in the spectral characteristics. The more eroded the soil, the higher was the spectral reflectance intensity between 600 and 2,400 nm. The absorption bands, due to iron oxides (850 nm), water (1,400 and 1,900 nm) and kaolinite (2,200 nm), were more intense in the eroded soils. Spectral data from LANDSAT were less detailed, for discriminating erosion levels in soils and, consequently, less efficient. Even under these conditions, bands 3, 4, 5 and 7 discriminated the non eroded soils from the eroded ones.*

Index terms: remote sensing, soil erosion, radiometry.

INTRODUÇÃO

Boa parte da agricultura no Brasil desenvolve-se mediante intensa pressão sobre os recursos naturais disponíveis, sendo o solo um dos mais afetados, decorrente do seu uso contínuo e, na maioria das vezes, de forma desmedida. Dos problemas causados por tal situação, a erosão tem sido o mais visível e um dos mais estudados, proporcionando informações sobre os montantes de terra perdidos nas mais diversas situações de manejo. Exemplo disto é o estado de São Paulo que perde por erosão 194 milhões de toneladas de terra por ano (Bertolini et al., 1993). Essas perdas de solo são uma consequência direta dos processos erosivos e causa de efeitos indiretos que agride o ambiente.

Quando ocorre erosão em áreas agrícolas, o solo transportado carrega os elementos nele presentes, provocando não só o assoreamento dos recursos hídricos existentes, mas também sua contaminação. Dessa forma, o potencial produtivo desses solos diminui, ocorrendo a necessidade de reposição dos elementos perdidos, elevando os custos de produção. Estima-se que, para produzir uma tonelada de soja, perdem-se por erosão 10 toneladas de terra, nos atuais sistemas de manejo, ou ainda, para produzir uma tonelada de milho, perdem-se 5 toneladas de terra (Lombardi Neto, 1997).

Baseado nestes aspectos, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas que auxiliem o diagnóstico de solos erodidos, para melhor monitoramento dos impactos ambientais.

O decréscimo da produtividade agrícola das terras devido aos processos erosivos, assim como sua recuperação, tem sido assunto de diversos trabalhos. Os métodos mais empregados para tais estudos foram resumidos por Sparovek et al. (1991), a saber: (1) ensaios simulados em casa de vegetação; (2) medidas feitas diretamente no campo; (3) elaboração de modelos empíricos baseados nos atributos dos solos; (4) remoção artificial de terra ou erosão simulada. Empregando o último método, já usado por Lal (1976), é possível ter-se um bom controle sobre as fontes de variação externas, assim como o de extrapolar resultados com relativa segurança para condições de erosão por chuva natural. Em relação à quantidade de terra a ser removida, não há um critério determinado. Assim, é que em seu trabalho, Dedecek (1987) removeu camadas de solo entre 0-20 nas espessuras de 0, 2, 5, 10 e 20 cm.

O sensoriamento remoto é uma alternativa auxiliar no estudo de solos. Sensores são utilizados em trabalhos que relacionam teores de matéria orgânica, argila e ferro, em amostras da superfície do solo, com sua radiância (Al-Abbas et al., 1972; Demattê, 1995; Vitorello & Galvão, 1996).

Na década de setenta, Seubert et al. (1979) estudaram a erosão do solo por meio da observação de espectros de reflectância em laboratório. Concluíram que havia diferença espectral de um solo erodido para um não erodido. Trabalhando em Indiana, com o intuito de desenvolver técnicas multiespectrais no mapeamento de solos, Weismiller

& Kaminsky (1978) determinaram que imagens MSS-LANDSAT ofereciam potencial para o diagnóstico de áreas severamente erodidas.

Por outro lado, trabalhos utilizando sensores em laboratório (Stoner & Baumgardner, 1981; Epiphanio et al., 1992; Formaggio et al., 1996) revelaram que solos diferentes possuem características espectrais distintas. Da mesma forma, trabalhos de Mathews et al. (1973), Demattê et al. (1998), Vitorello & Galvão (1996); Demattê & Garcia (1999) indicaram a existência de relação entre as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos e seus respectivos dados espectrais.

Com base nas observações de Stoner & Baumgardner (1980), Pazar (1983) afirmou, depois de uma série de ensaios, que os critérios espectrais quantitativos poderiam ser utilizados para definir uma classificação de erosão.

Diante do potencial observado, Latz et al. (1984) retomaram os estudos relacionados com a erosão do solo. Utilizando amostras de três grupos distintos de Alfisols, dos Estados Unidos, verificaram haver diferenças espectrais entre níveis distintos de erosão simulada. Tais autores simularam, por meio de dados de laboratório, respostas para o sistema de varredura multiespectral (MSS) do satélite LANDSAT. Concluíram que a variação na quantidade de matéria orgânica e a presença de óxidos de ferro foram os principais atributos de distinção entre os níveis de erosão que, por sua vez, refletiram-se no caráter espectral.

Bober & MacBride (1996) verificaram a utilidade do uso de imagens como complemento de informações para determinar áreas degradadas pelo manejo inadequado dos solos. Palylyk et al. (1991) utilizaram imagens do TM-LANDSAT de dois anos sucessivos, para prever áreas vulneráveis à erosão. Tais trabalhos demonstraram a importância do entendimento dos dados espectrais como complemento na avaliação de áreas degradadas.

Portanto, utilizando espetrorradiômetro em laboratório na faixa espectral entre 400 e 2.500 nm, os objetivos deste trabalho foram: (a) determinar se a variação dos atributos do solo, simulando um processo erosivo, é detectada pela reflectância espectral, obtida em laboratório, entre 400 e 2.500 nm; (b) utilizando os dados entre 400 e 2.500 nm, simular a resposta espectral do TM/LANDSAT-5, verificando sua eficiência na detecção dos níveis simulados de erosão.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

Os solos estudados localizam-se na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" no município de Piracicaba (SP). Eles ocorrem numa topossequência caracterizada por material

retrabalhado da Formação Rio Claro, definido por Penteado (1969) e constituído predominantemente por depósitos arenosos e de cascalhos, assentado sobre a formação Corumbataí (Almeida et al., 1981).

Nas cotas inferiores da topossequência em estudo, existe afloramento de um depósito de diabásio intemperizado, interrompendo a continuidade da Formação Corumbataí, que mais abaixo aflora e se assenta sobre a Formação Irati, cuja base é o diabásio (Demattê & Marconi, 1991).

A região é caracterizada por um clima subtropical de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C, e a do mais quente ultrapassa 22°C. A precipitação média anual está em torno de 1.200 mm, concentrada durante o verão (Brasil, 1960).

Caracterização dos solos e obtenção das amostras

Quatro perfis de solos localizados desde a parte alta até a parte baixa da topossequência foram caracterizados de acordo com Lemos & Santos (1996). Os solos foram classificados como Latossolo Vermelho-Amarelo (LV), Terra Roxa Estruturada latossólica (TRL), Cambissolo (C) e Vertissolo (V), de acordo com Camargo et al. (1987). Conforme as características de textura, profundidade efetiva, pedregosidade, relevo e declividade, os solos foram classificados de acordo com o risco de erosão (Quadro 1).

O LV e a TRL estão sendo cultivados com culturas anuais, enquanto o V com cana-de-açúcar. Por sua vez, o C, em razão da declividade acentuada e da pedregosidade, está reflorestado.

Simular o grau de erosão pela remoção artificial de camadas do solo permite um bom controle sobre as fontes de variação externas (Dedecek, 1987). Por isso foram coletadas amostras de terra em diversas profundidades da trincheira. Ao mesmo tempo, e de acordo com a camada de terra amostrada, as classes de erosão foram designadas como: profundidade 0-5 cm (erosão nula), 10-20 cm (erosão ligeira), 40-60 cm (erosão moderada), 60-80 cm (erosão severa).

Foram retiradas três amostras simples de cada face da trincheira nas mesmas profundidades já estabelecidas e enviadas para análises granulométricas, químicas e radiométricas.

Obtenção dos dados espectrais

As amostras de solo foram secas em estufa a 45°C por 24 h, moídas e peneiradas em peneira de 2 mm, para homogeneização. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em placas de petri de 9 cm de diâmetro por 1,5 cm de altura e niveladas, para que a superfície ficasse o menos rugosa possível. O sensor utilizado foi o Infra Red Intelligent Spectroradiometer (IRIS), com resolução de 2 nm na faixa de 400 a 1.000 nm e 4 nm entre 1.000 e 2.500 nm. A partir

Quadro 1. Características gerais dos perfis amostrados e sua classificação

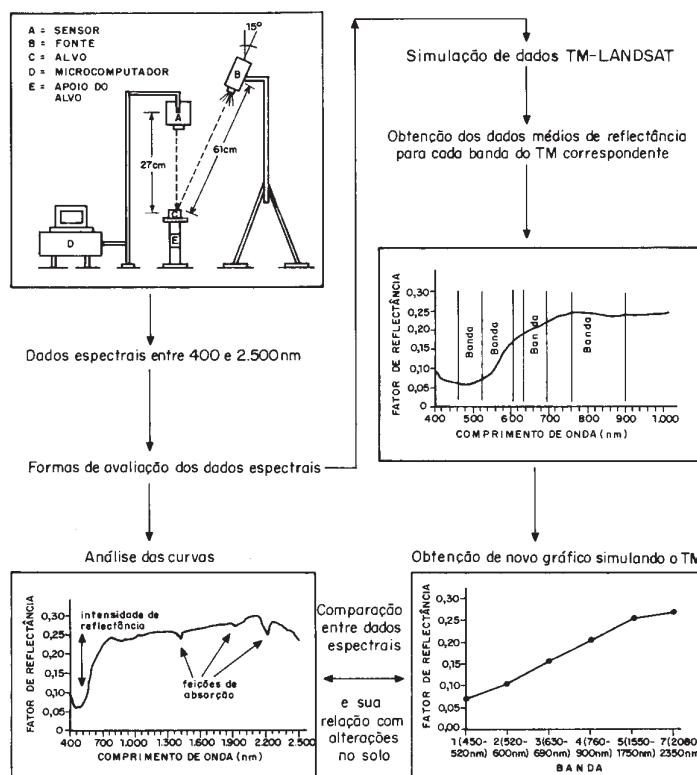
Perfil	Posição na vertente	Declividade	Drenagem	Classificação do solo	Vulnerabilidade à erosão ⁽¹⁾
P1	Topo	4,17	Fortemente drenado	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico A moderado textura média (LV)	Médio
P2	Meia encosta superior	3,12	Bem drenado	Terra Roxa Estruturada Latossólica eutrófica A moderado textura muito argilosa (TRI)	Baixo/médio
P3	Meia encosta inferior	30,00	Moderadamente drenado	Cambissolo eutrófico A moderado textura argilosa substrato basalto (C)	Alto
P4	Sopé da encosta	5,00	Imperfeitamente drenado	Vertissolo eutrófico A chernozêmico textura argilosa (V)	Médio

⁽¹⁾ De acordo com as características do solo: textura, profundidade efetiva, relevo, declividade e posição na vertente (Ranieri, 1996).

dessa resolução, o sensor obtém aproximadamente 675 pontos (ou bandas) entre 400 e 2.500 nm para elaboração da curva espectral. A geometria para a aquisição dos dados de reflectância é observada na figura 1. Utilizou-se, como padrão de referência absoluta, uma placa com 100% de reflectância. 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 espectral" (Nicodemus et al., 1977). Foram realizadas três medidas radiométricas por amostra de solo.

Os dados espectrais foram avaliados por meio das curvas médias espectrais entre 400 e 2.500 nm. Também foram utilizados para gerar outros resultados, simulando as bandas do sensor Thematic Mapper (TM) LANDSAT-5. Para tanto, foi calculada

**Figura 1.** Fluxograma ilustrando a obtenção dos dados espectrais e sua avaliação.

a média das respostas espectrais obtidas pelo sensor IRIS, nas faixas de comprimentos de onda correspondentes às bandas do TM-LANDSAT. São elas: 450-520, 520-600, 630-690, 760-900, 1.550-1.750, 2.080-2.350 nm, as quais correspondem, respectivamente, às bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 (Figura 1).

As avaliações das curvas espectrais foram realizadas de acordo com as intensidades de reflectância das bandas e as feições de absorção e sua relação com os teores de ferro e matéria orgânica principalmente.

Análises de solo

Nas análises químicas, determinaram-se: pH (CaCl_2), teor de carbono orgânico, fósforo, potássio, magnésio, cálcio, alumínio e hidrogênio mais alumínio, segundo método descrito em Raij et al. (1987). Foram determinados teores de areia, silte e argila (Camargo et al., 1986). A sílica, a alumina e o ferro foram determinados após extração pelo ataque sulfúrico (Camargo et al., 1986). Para caracterizar os solos, realizaram-se análises mineralógicas da fração argila de acordo com Jackson (1969), as quais consistiram num pré-tratamento para eliminação da matéria orgânica (água oxigenada a 30%) e ferro livre (ditionito-citrato-bicarbonato de sódio). A seguir,

procedeu-se à separação granulométrica da fração areia (peneiração úmida), frações silte e argila (decantação). Amostras da fração argila foram saturadas por K^+ e por Mg^{+2} e, posteriormente, transferidas para lâminas de vidro (esfregaço) e irradiadas por raios-X. As amostras de argila foram irradiadas num intervalo de 3 a 32 graus 2 θ . Foram obtidos difratogramas das amostras saturadas por K^+ a 25°C, 350°C e 550°C, e as saturadas por Mg^{+2} e glicoladas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Erosão e atributos dos solos

A erosão, simulada pelo procedimento de coleta de amostras de solo em diferentes profundidades, contribuiu para a diminuição da fertilidade. Em todos os perfis estudados, elementos como o fósforo e, em muitos casos, também potássio, decresceram na medida em que a erosão do solo tornou-se severa (Quadro 2). Essa constatação concorda com a afirmativa de Pandolfo (1994) que considera grandes perdas de fósforo, provocadas pela erosão.

Quadro 2. Valores médios⁽¹⁾ das análises químicas dos solos

Amostra ⁽²⁾	Classe de erosão	pH CaCl_2	M.O.	P	K	Ca	Mg	Al	H + Al	S ⁽³⁾	T ⁽³⁾	V ⁽³⁾	m ⁽³⁾
g kg ⁻¹ mg kg ⁻¹ mmol _c kg ⁻¹ — % —													
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LV)													
p1a	Nula	5,1	52 a ⁽⁴⁾	12	1,4	34	14	2	34	49,4	85,4	58	4
p1b	Ligeira	4,4	16 b	3	0,6	8	5	4	41	13,6	58,6	23	27
p1c	Moderada	4,7	12 bc	1	0,9	6	2	3	24	8,9	35,9	25	21
p1d	Severa	4,6	9 c	2	0,7	6	2	2	19	8,7	29,7	29	13
Terra Roxa Estruturada Latossólica eutrófica (TRI)													
p2a	Nula	5,4	36 a	26	5,1	27	13	0	19	45,1	60,3	74	0
p2b	Ligeira	4,9	19 b	14	4,7	19	10	0	42	33,7	75,7	45	0
p2c	Moderada	5,1	17 b	5	1,1	22	9	0	42	32,1	74,1	45	0
p2d	Severa	5,4	14 b	11	0,9	43	6	0	36	49,9	85,9	58	0
Cambissolo de basalto eutrófico (C)													
p3a	Nula	5,6	42 a	67	7,8	100	21	0	61	128,8	189,8	68	0
p3b	Ligeira	5,8	19 b	80	2,1	210	28	0	29	240,0	269,0	83	0
p3c	Moderada	5,9	14 b	51	1,7	210	26	0	25	237,0	252,0	94	0
p3d	Severa	6,0	15 b	37	1,9	140	21	0	19	182,9	182,9	89	0
Vertissolo (V)													
p4a	Nula	5,4	28 a	19	1,2	64	19	0	20	84,2	104,2	80	0
p4b	Ligeira	5,1	37 b	22	0,6	61	17	0	52	78,6	130,6	60	0
p4c	Moderada	5,3	19 c	18	0,7	92	31	0	46	123,7	169,7	73	0
p4d	Severa	4,9	16 c	9	0,3	91	30	19	42	121,3	163,3	74	14

⁽¹⁾ Média de três repetições. ⁽²⁾ p1 a p4: número do perfil; a, b, c, d, amostras de solos coletadas às profundidades de 0-5, 10-20, 40-60, 60-80 cm, referentes, respectivamente, aos níveis de erosão nula, ligeira, moderada e severa. ⁽³⁾ S: soma de bases; T: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio. ⁽⁴⁾ Resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente pelo teste t a 5%.

Comportamento semelhante pode ser observado nos teores de matéria orgânica apresentadas no quadro 2. Sparovek et al. (1993), trabalhando com erosão simulada, verificaram que um dos principais atributos no rendimento de plantas cultivadas foi a presença de matéria orgânica nas camadas superficiais. Neste contexto, o quadro 2 mostra que, dentro de uma classificação de erosão, onde vão sendo perdidas camadas de solo, ocorre grande decréscimo nas quantidades de matéria orgânica. Tal fato pode acarretar problemas no solo, como a menor retenção de água e nutrientes, menor agregação, dentre outros (Kiehl, 1985).

A análise física (Quadro 3) caracterizou os solos como de textura argilosa, com exceção do LV. Com esta característica, esses solos são menos propensos a um processo de erosão natural, diante da resistência proporcionada pela presença de argila. Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1990), a distribuição quantitativa das classes de tamanho de partículas que compõem o solo é de extrema importância na escolha do uso e manejo dos solos.

Por outro lado, a posição no relevo e a declividade contribuem significativamente para o processo erosivo. Nesse caso, o Cambissolo (C) encontra-se no meio da encosta com declividade de 30% (Quadro 1).

Aliado a isto, é um solo com drenagem moderada a imperfeita, tendendo a apresentar maior deflúvio do que infiltração de água (França & Demattê, 1990), com consequente aumento da vulnerabilidade de erosão.

O Vertissolo (V), por sua vez, além de ser argiloso, encontra-se numa posição de relevo quase plano, com pequena declividade e, apesar da drenagem imperfeita, apresenta menor vulnerabilidade à erosão.

Curvas espectrais e erosão do solo

As curvas espectrais do LV e TRI (Figura 2) mostram que as menores intensidades de reflectância estão associadas ao nível de erosão nulo, e ocorreram entre 650 e 2.450 nm, por apresentarem as amostras de erosão nula maior teor de matéria orgânica (Quadro 2) que absorve mais energia, diminuindo a reflectância entre 400 e 1.200 nm (Mathews et al., 1973) ou em todo o espectro óptico (Courault & Girard, 1988; Madeira Netto, 1996). Para a erosão ligeira, há diminuição do teor de matéria orgânica (Quadro 2) produzindo aumento na intensidade de reflectância (Figura 2), o que também foi observado por Latz et al. (1984).

Para os níveis de erosão moderada e severa, a intensidade da curva entre 400 e 2.500 nm não se associa aos níveis de erosão, principalmente no caso

Quadro 3. Classe de erosão, cor do solo e valores médios⁽¹⁾ das análises granulométricas, teor de Fe₂O₃ e Ki

Amostra⁽²⁾	Classe de erosão	Cor úmida⁽³⁾	Granulometria			Fe₂O₃⁽⁵⁾	Ki⁽⁶⁾				
			Areia	Silte	Argila						
g kg⁻¹											
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LV)											
p1a	Nula	7,5YR3/2	660	100	240	39 a ⁽⁷⁾	1,8				
p1b	Ligeira	3YR4/4	700	90	210	32 a	1,9				
p1c	Moderada	5YR4/5	630	80	290	41 a	1,9				
p1d	Severa	5YR4/6	610	80	310	44 a	1,8				
Terra Roxa Estruturada Latossólica eutrófica (TRI)											
p2a	Nula	5YR3/3	300	160	540	182 a	1,5				
p2b	Ligeira	2,5YR2/4	270	170	560	179 a	1,6				
p2c	Moderada	2,5YR3/3	160	120	720	198 a	1,7				
p2d	Severa	2,5YR3/3	170	100	730	191 a	1,6				
Cambissolo de basalto eutrófico (C)											
p3a	Nula	5YR3/3	410	240	350	216 a	2,3				
p3b	Ligeira	2,5YR2/4	330	230	440	204 a	2,3				
p3c	Moderada	2,5YR3/3	300	230	490	202 a	2,2				
p3d	Severa	2,5YR3/3	290	230	480	211 a	2,4				
Vertissolo (V)											
p4a	Nula	7,5YR3/0 + 7,5YR4/4 ⁽⁴⁾	360	260	380	243 a	2,6				
p4b	Ligeira	2,5YR4/0	430	240	330	114 b	2,8				
p4c	Moderada	7,5YR4/0 + 7,5YR5/6 ⁽⁴⁾	370	190	440	68 c	3,1				
p4d	Severa	7,5YR + 7,5YR4/4 ⁽⁴⁾	290	190	520	86 c	3,0				

⁽¹⁾ Média de três repetições. ⁽²⁾ p1 a p4: número do perfil; a, b, c, d, amostras de solos coletadas às profundidades de 0-5, 10-20, 40-60, 60-80 cm, referentes, respectivamente, aos níveis de erosão nula, ligeira, moderada e severa. ⁽³⁾ Munsell Color Charts, Baltimore, Maryland, U.S.A., 1954. ⁽⁴⁾ Presença de mosqueado. ⁽⁵⁾ Ferro extraído pelo ataque sulfúrico. ⁽⁶⁾ Relação molecular SiO₂/Al₂O₃. ⁽⁷⁾ Resultados seguidos da mesma letra não diferem significativamente pelo teste *t* a 5% de probabilidade.

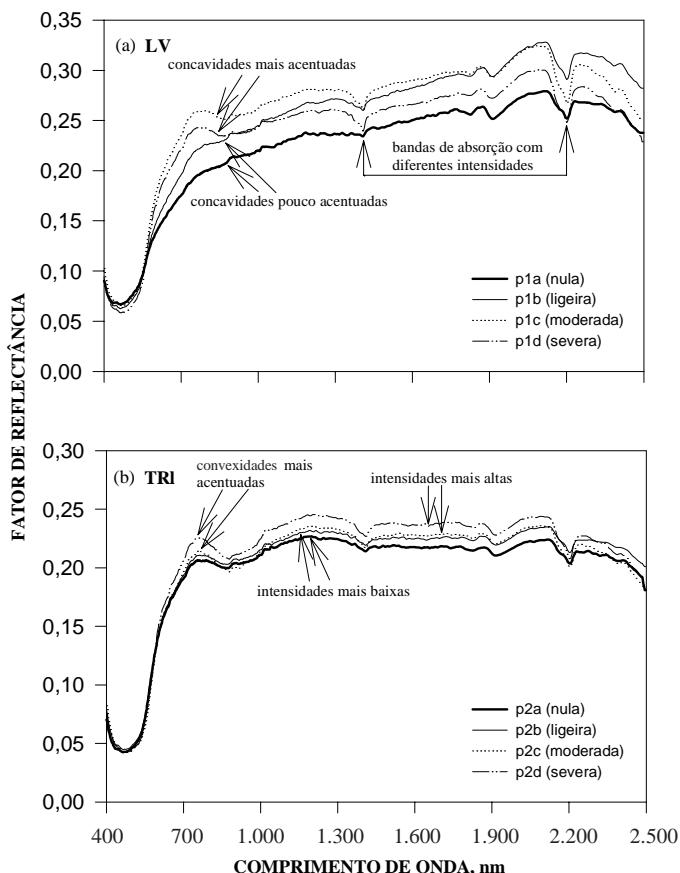


Figura 2. Dados espectrais obtidos com sensor terrestre do Latossolo Vermelho-Amarelo LV (a) e Terra Roxa Estruturada Latossólica TR1 (b) designados por diferentes níveis de erosão.

do LV (Figura 2a), ou seja, entre os níveis de erosão ligeira, moderada e severa, não ocorreu a mesma seqüência de aumento da reflectância.

Na TR1, entre 700 e 2.150 nm, observa-se que a intensidade de reflectância aumentou na mesma intensidade que a erosão (Figura 2b), concordando com resultados de Seubert et al. (1979) e de Latz et al. (1984).

No Cambissolo (C), a curva espectral mostra intensidade mais baixa, reflexo da presença de matéria orgânica em superfície que mascara o efeito dos óxidos de ferro. Em contrapartida, à medida que as camadas mais superficiais são retiradas mediante a simulação da erosão, ocorre o aparecimento de uma concavidade mais forte entre 800 e 1.000 nm (Figura 3a), evidenciando o efeito dos óxidos de ferro, como ocorreu com Latz et al. (1984).

No Vertissolo (V), apenas a erosão severa provocou uma reflectância maior, enquanto as demais curvas se confundem em termos de intensidade (Figura 3b).

As bandas em 1.400 e 1.900 nm do LV (Figura 2a) são devidas às vibrações das moléculas de água presentes nos minerais de argila (Lindberg & Snyder, 1972). Em 1.400 nm soma-se a influência dos grupos OH⁻, enquanto a banda em 2.200 nm (com formato característico) reflete a presença de caulinita (Mathews et al., 1973). O LV, com Ki na faixa de 1,9 (Quadro 3), apresentou a caulinita como um dos principais minerais de argila, conforme análise de raios-X (Figura 4a). A intensidade de absorção das bandas em 1.400 e 2.200 nm alterou-se na medida em que aumentaram os níveis de erosão. Neste caso, os dados apresentaram-se mais consistentes que para a intensidade da curva entre 400 e 2.500 nm. Observou-se que, no LV, a banda em 1.400 e 2.200 nm é fraca para erosão nula, moderada para erosão ligeira e mais forte para a moderada e severa (Figura 2a). É provável que isto se deva à diminuição do teor de matéria orgânica que tem efeito de mascaramento sobre outros constituintes do solo e, por consequência, atenua a intensidade das bandas de absorção (Baumgardner et al., 1970). Da mesma

forma, a redução de matéria orgânica permitiu sobressair o efeito dos óxidos de ferro na curva de reflectância. Isto pode ser observado na figura 2a pela concavidade mais acentuada nos níveis de erosão moderada e severa, entre 750 e 1.000 nm, a qual está associada aos óxidos de ferro (Vitorello & Galvão, 1996).

A mesma tendência foi observada para a TRI (Figura 2b). Verificou-se que os teores de ferro da TRI e do LV não se alteraram em profundidade, ao contrário da matéria orgânica (Quadros 2 e 3), mostrando que, apesar de o teor de ferro total não se alterar para a erosão nula e severa, a concavidade é diferente entre 750 e 1.000 nm, devida a influência da matéria orgânica. Segundo Latz et al. (1984), a influência dos óxidos de ferro em profundidade ocasiona um aumento na convexidade da curva entre 500 e 800 nm, seguida de uma concavidade entre 800 e 1.000 nm. Ao mesmo tempo, a presença de óxidos de ferro em profundidade promove a concavidade na curva espectral em 850 nm (Vitorello & Galvão, 1996).

A TRI apresentou valores de K_i de 1,6, menor que o LV, bem como teores de ferro entre quatro a cinco

vezes mais elevados (Quadro 3). Este solo é caracterizado por apresentar mais óxidos de ferro, o que explica a concavidade mais forte entre 700 e 1.000 nm (Figura 2) em relação ao LV, concordando com Vitorello & Galvão (1996). Além disso, a análise mineralógica indicou a presença de caulinita, o que é refletido na curva espectral pela banda a 2.200 nm. Por outro lado, este solo também apresentou gibbsita, caracterizado pelos picos em 0,47 e 0,42 nm com tratamento K 25°C (Figura 4b) e colapso desses picos com aquecimento a 550°C. A presença de gibbsita na curva espectral é caracterizada pela banda de absorção em 2.265 nm (Madeira Netto, 1996). Entretanto, os resultados mostraram haver banda de absorção em 2.265 nm, muito ténue (Figura 2a), indicando pequena contribuição desse óxido de alumínio.

O Cambissolo apresentou valores de K_i de 2,2 a 2,4 (Quadro 3), caracterizando-se como o solo menos intemperizado que os anteriores. Este solo apresentou minerais 2:1 como a vermiculita, caracterizada pelos picos na faixa de 1,4 nm para tratamentos K 25°C, e Mg glicolado e 1,0 nm com aquecimento a 550°C (Figura 4c). A caulinita

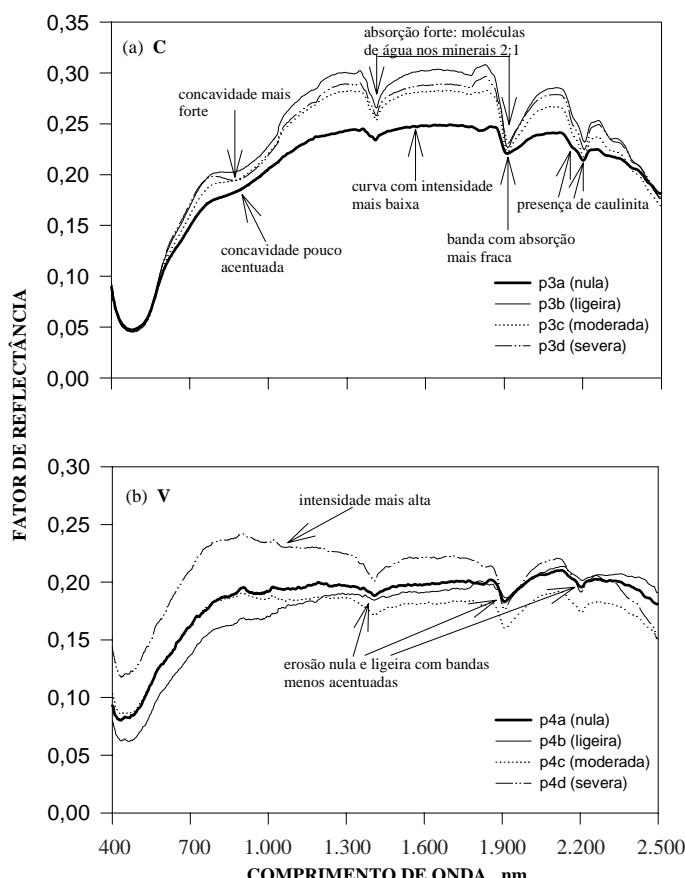


Figura 3. Dados espectrais obtidos com sensor terrestre do Cambissolo C (a) e Vertissolo V (b) designados por diferentes níveis de erosão.

também foi observada como um mineral importante neste solo. Estas características mineralógicas refletiram-se na curva espectral, conforme se observa na banda a 2.200 nm relacionada com os grupos OH da caulinita (Mathews et al., 1973). A banda em 1.400 nm é devida aos grupos OH e às vibrações das moléculas de água, enquanto em 1.900 nm é devida à água (Lindberg & Snyder, 1972). Demattê et al. (1998), por sua vez, observaram que a curva da montmorilonita apresentou forte absorção em 1.900 nm diferenciando-se da caulinita. Por sinal, a vermiculita, mineral 2:1, também promove forte banda de absorção em 1.900 nm (Grove et al., 1992), como ocorrida nas curvas do C e detectada nas análises de raios-X.

No caso do C, a intensidade da curva espectral entre 600 e 2.400 nm foi menor para erosão nula e

maior nas demais (Figura 3a). A avaliação da intensidade das feições de absorção também evidenciou diferenças entre a erosão nula e as demais. Porém, entre os níveis ligeiro a severo, a intensidade da curva entre 600 e 2.500 nm não se relacionou. O mesmo ocorreu quando se analisou a intensidade das bandas de absorção em 1.400, 1.900 e 2.200 nm. Por outro lado, a forma da curva na faixa espectral entre 750 e 1.000 nm, relacionada com os óxidos de ferro (Vitorello & Galvão, 1996), modificou-se (Figura 3a). A concavidade é pouco acentuada para erosão nula e ligeira e mais forte para erosão severa. Isto pode ter ocorrido por causa da diminuição da matéria orgânica de 42 g kg⁻¹ na superfície para 15 g kg⁻¹ na última camada (Quadro 2), permitindo sobressair o efeito dos óxidos de ferro presentes no solo.

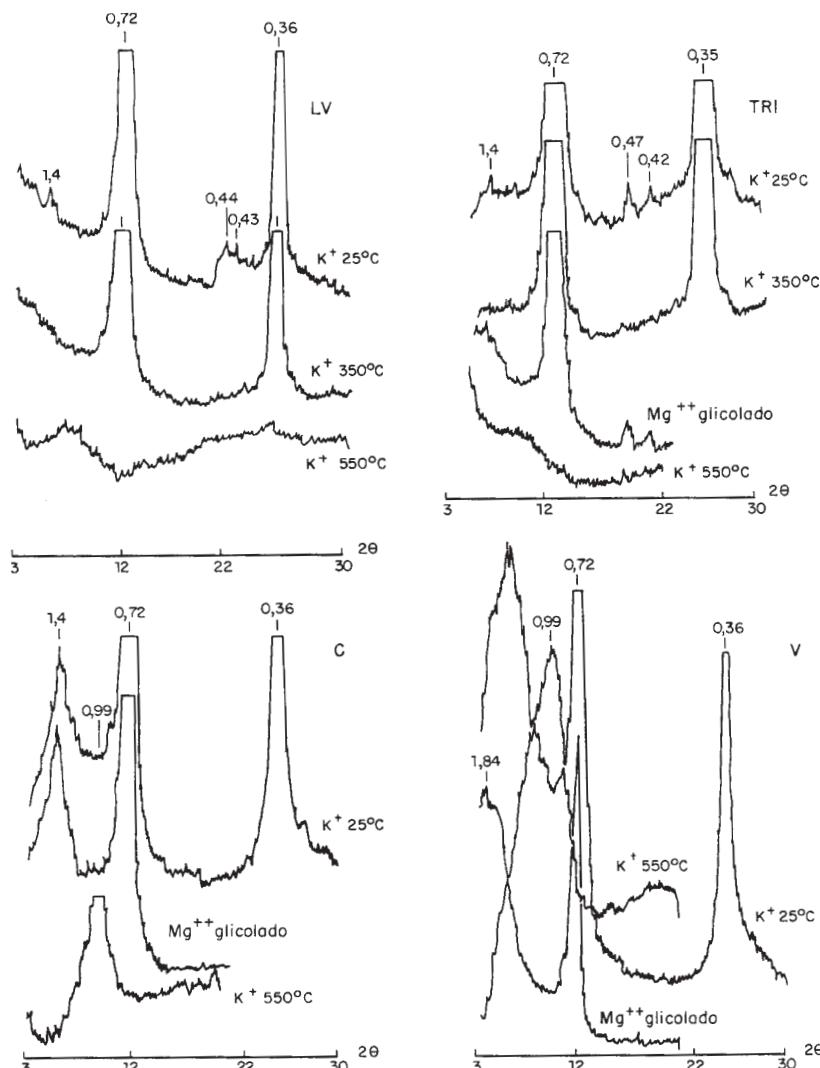


Figura 4. Difratogramas de raios-X da fração argila desferrificada: (a) LV-amosta p1c; (b) TRI-amosta p2c; (c) C-amosta p3b; (d) V-amosta p3c (valores de d em nanômetros).

As observações relativas às intensidades das bandas de absorção concordam com Stoner & Baumgardner (1981). Tais autores verificaram que as duas principais características atuantes na resposta espectral dos solos são os conteúdos de matéria orgânica e ferro. Enquanto a matéria orgânica encontra-se em maior quantidade na superfície dos solos, mascarando a presença dos óxidos de ferro, estes têm sido determinados mais facilmente nas curvas espectrais quando em profundidade, onde a presença de matéria orgânica é menor. Assim, de acordo com as quantidades desses elementos no solo, as curvas espectrais resultantes terão bandas de absorção e intensidades distintas. As afirmações desses autores com relação à diferença da intensidade nas curvas espectrais são visíveis nas respostas obtidas. As curvas que correspondem ao nível nulo de erosão (que possuem maior quantidade de matéria orgânica) têm intensidade mais baixa do que as de nível severo, onde a expressão dos óxidos de ferro é predominante. Neste caso, torna-se importante a obtenção de dados espectrais quantitativos como informações auxiliares na definição e diagnóstico de classes de erosão, concordando com Pazar (1983).

No Vertissolo (Figura 3b), a avaliação da intensidade das bandas de absorção em 1.400, 1.900 e 2.200 nm também se mostrou mais eficiente na discriminação dos níveis de erosão, ao contrário da intensidade da curva entre 400 e 2.500 nm. Observou-se um aumento gradativo da intensidade de absorção dessas bandas de acordo com o aumento do nível de erosão.

O Vertissolo é um solo pouco intemperizado com Ki na faixa de 2,6 a 3,0 (Quadro 3). Esse solo apresentou como minerais de argila predominantes a esmectita e a caulinita (Figura 4d). À semelhança do ocorrido nas curvas do C, as curvas do V apresentaram uma banda de absorção forte em 1.900 nm (Figura 3b). Tudo indica que essa banda seja devida à absorção proporcionada pelas vibrações das moléculas de água, principalmente nos minerais 2:1 (esmectita), concordando com observações de Demattê et al. (1998).

No Vertissolo, apesar de apresentar teor de ferro total na faixa de 114 g kg⁻¹, a concavidade em 850 nm não ocorreu. Considerando que a concavidade em 850 nm é devida à presença dos óxidos de ferro cristalinos, hematita e goethita (Vitorello & Galvão, 1996), e que, sendo o V um solo jovem e pouco intemperizado, provavelmente as diferenças de intensidade sejam devidas ao ferro com baixo grau de cristalinidade. Tal observação concorda com os de Demattê & Leite (1998) e Demattê & Garcia (1999) que observaram que o ferro com baixo grau de cristalinidade altera a intensidade da curva espectral, mas não sua concavidade.

Dados simulados do TM-LANDSAT e erosão do solo

Os dados simulados do sensor IRIS nas mesmas faixas de reflectância das bandas do sensor Thematic

Mapper do LANDSAT-5, neste trabalho, permitiram obter gráficos espectrais com um máximo de seis pontos, cada qual referente a uma banda. Nessa situação, observou-se nítida perda de detalhes do caráter espectral dos solos (Figuras 5 e 6), quando comparado com as curvas obtidas com sensor terrestre que obteve 675 pontos ou bandas para elaboração da curva espectral. Isto ocorreu pela forma que os dados do sensor terrestre foram manipulados (médias aritméticas das faixas correspondentes às bandas) para simular o TM - LANDSAT, tendo as curvas obtidas com os 675 pontos demonstrado um nível de detalhamento muito maior.

Dada a ausência de visualização das bandas de absorção e formato das curvas espectrais, a avaliação tem de ser realizada por meio da intensidade de reflectância.

Observando a intensidade das bandas individualmente, verificou-se que, para o LV, TRL e C, as bandas 1 e 2 não discriminaram as áreas erodidas, enquanto no V sim (Figuras 5 e 6). A faixa espectral devida a estas bandas é muito influenciada pela matéria orgânica e óxidos de ferro. Pelo quadro 2, a matéria orgânica variou da camada superficial para a subsuperficial em todos os solos. Em contrapartida, o teor de ferro (Quadro 3) foi homogêneo em todos os solos, mas diminuiu significativamente em profundidade no V, alterando as intensidades de reflectância.

Para o LV (Figura 5a), as bandas 3 e 4 mostraram aumento da intensidade da reflectância à medida que a erosão vai de nula para ligeira. Por outro lado, nas bandas 5 e 7, a erosão ligeira inverte e passa a ter maior intensidade que a severa, concordando com Latz et al. (1984). Na TRL, as diferenças ocorreram principalmente entre a erosão nula e a severa na banda 5 (Figura 5b).

Para o caso do C (Figura 6a), as bandas 3, 4, 5 e 7 discriminaram a erosão nula das demais. No V, por sua vez, a curva da erosão ligeira está com menor reflectância que a erosão nula, o que se explica pelo maior teor de matéria orgânica ocorrente nas amostras (Quadro 2).

Os gráficos lineares mostraram uma tendência ascendente das bandas 1 para a 3, com decréscimo na inclinação entre as bandas 3 e 4, como ocorreu no trabalho de Latz et al. (1984). Segundo esse mesmo autor, como a severidade da erosão é mais bem detectada na faixa entre 750 e 950 nm, a inclinação na resposta espectral decresce nesta faixa. Isto ocorre devido ao decréscimo do conteúdo de matéria orgânica em profundidade e melhor expressão dos óxidos de ferro detectados quando há erosão severa. Para os solos LV, TRL e V, observou-se que as curvas espectrais dos níveis de erosão nula e ligeira (Figuras 5 e 6) apresentaram tendência ascendente. Isto pode ser explicado pela tendência da intensidade de reflectância entre as bandas 5 e 7,

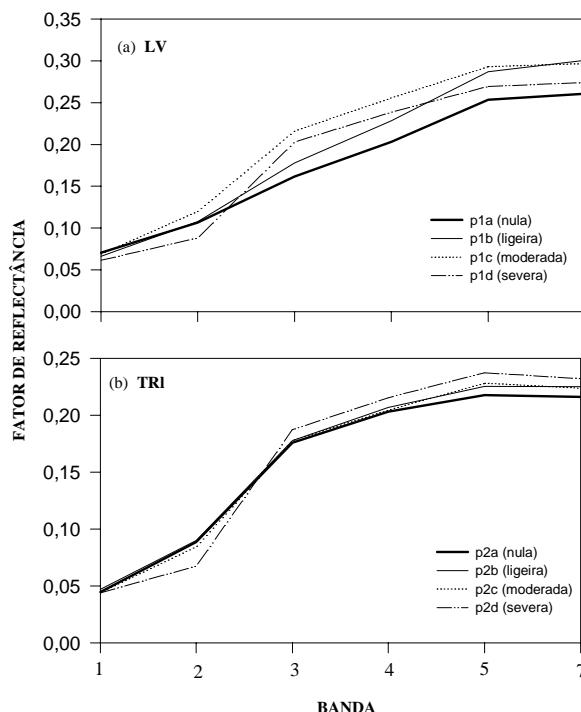


Figura 5. Dados espectrais simulados do TM-LANDSAT, do Latossolo Vermelho-Amarelo LV (a) e Terra Roxa Estruturada latossólica TRI (b) designados por diferentes níveis de erosão. Bandas: 1, 450-520 nm; 2, 520-600 nm; 3, 630-690 nm; 4, 760-900 nm; 5, 1.550-1.750- nm; 7, 2.080-2.350 nm.

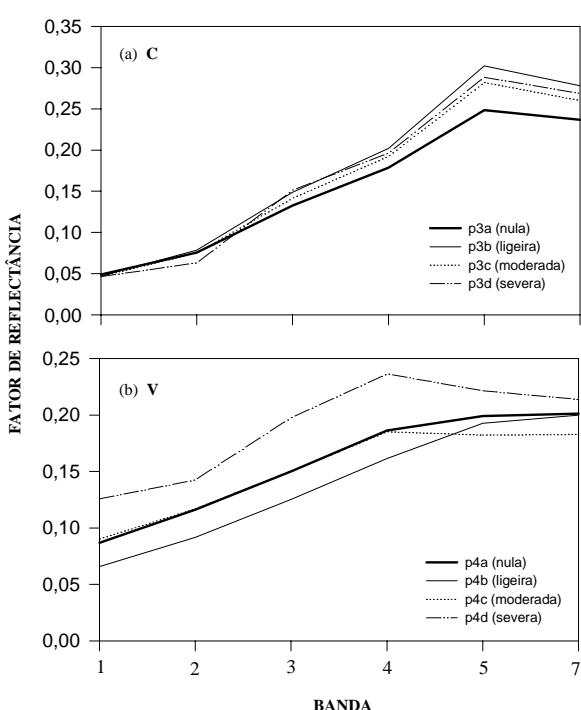


Figura 6. Dados espectrais simulados do TM-LANDSAT do Cambissolo C (a) e Vertissolo V (b) designados por diferentes níveis de erosão. Bandas: 1, 450-520 nm; 2, 520-600 nm; 3, 630-690 nm; 4, 760-900 nm; 5, 1.550-1.750- nm; 7, 2.080-2.350 nm.

a qual é ascendente para a erosão nula e ligeira e descendente para a erosão moderada e severa.

Os resultados proporcionam a indicação de áreas erodidas por meio da avaliação da tendência da curva simulada de dados orbitais, concordando com Latz et al. (1984), havendo, entretanto, perda de detalhes em relação aos dados das curvas espectrais de laboratório com melhor resolução espectral. A avaliação da tendência e intensidade das bandas pode-se configurar numa informação complementar no diagnóstico dos níveis de erosão, concordando com Palylyk et al. (1991) e Bober & MacBride (1996). Entretanto, os dados obtidos neste trabalho são uma simulação dos gráficos de dados orbitais. Neste caso, não foram considerados os problemas geométricos e atmosféricos que alteram os resultados dos solos quando obtidos ao nível orbital (Guyot et al., 1996). Em função dessas considerações, os dados simulados orbitais deste trabalho são um indicativo das tendências que podem ocorrer nos dados espectrais de solos erodidos, porém sem considerar os fatores citados. Daí, devem ser realizadas novas pesquisas nesta linha, haja vista o potencial que possui para avaliação ambiental.

CONCLUSÕES

1. Na medida em que aumentou o grau de erosão, ocorreram alterações, principalmente no teor de matéria orgânica, provocando modificações no caráter espectral.

2. Em relação aos dados do sensor terrestre: (a) o nível de erosão nula apresentou menor intensidade de reflectância entre 400 e 2.500 nm do que os demais níveis, em função do maior teor de matéria orgânica, mostrando-se eficiente nesta discriminação; (b) entre os níveis de erosão ligeira, moderada e severa, a intensidade de reflectância entre 400 e 2.500 nm não se mostrou eficiente na discriminação, com exceção do ocorrido na TRL; c) na medida em que se aumentou o grau de erosão, as bandas de absorção em 1.400, 1.900 e 2.200 nm aumentaram a sua intensidade. As feições de absorção devidas aos óxidos de ferro entre 750 e 1.100 nm apresentaram maior concavidade nos níveis de erosão mais acentuados; d) a análise conjunta das feições de absorção e intensidade de reflectância mostrou-se eficiente na discriminação de diferentes níveis de erosão.

3. Todos os solos revelaram diferença de intensidade da reflectância de 600 e 2.400 nm, dos solos com erosão nula para a severa. Porém, nem sempre houve relação direta entre o aumento do nível da erosão e o aumento da intensidade de reflectância.

4. Em relação aos dados simulados do TM/LANDSAT-5, os resultados não permitiram visualizar as bandas de absorção; entretanto, através da

intensidade de reflectância e tendência da curva, foi possível discriminar a erosão nula das demais, principalmente nas bandas 3, 4, 5 e 7.

AGRADECIMENTO

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pelo apoio na aquisição do sistema sensor IRIS (Infra Red Intelligent Spectroradiometer), processo nº 1995/6259-6 sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa.

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.
- ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; PONÇANO, W.L.; DANTAS, A.S.L.; CARNEIRO, C.D.R.; MELLO, M.S. & BIATRICHINI, C.A. Mapa geológico do estado de São Paulo. São Paulo, Instituto de Pesquisa Técnica, 1981. 126p. (Monografia, 6)
- BAUMGARDNER, M.F.; KRISTOF, S.J.; JOANNSEN, C.J. & ZACHARY, A.L. Effects of organic matter on the multiespectral properties of soils. *Proc. Ind. Acad. Sci.*, 79:413-422, 1970.
- BERTOLINI, D.; LOMBARDI NETO, F. & DRUGOWICH, M.I. Programa Estadual de Bacias Hidrográficas. Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo. Campinas: CATI (impresso especial), 1993. 17p.
- BERTONI, J. & LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. São Paulo. Ícone, 1990. 355p.
- BOBER, M.L. & McBRIDE, R.A. Use of digital image analysis and GIS to assess regional compaction risk. *Photog. Eng. & Rem. Sens.*, 62:1397-1404, 1996.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Serviço. Serviço Nacional de Pesquisa Agronômica. Levantamento de reconhecimento de solos do estado de São Paulo. Rio de Janeiro, 1960. 634p. (Boletim Técnico, 12)
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do IAC. Campinas, IAC, 1986, 94p. (IAC Boletim Técnico, 106)
- CAMARGO, M.N.; KLANT, E.S. & KAUFMAN, J.H. Classificação de solos usada em levantamentos pedológicos no Brasil. Separata do B. Inf., Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 12:11-33, 1987.
- COURAULT, D. & GIRARD, M.C. Relationships between the soils composition and their spectral signature. In: ISSS SYMPOSIUM OF THE WORKING GROUP REMOTE SENSING, 5., Budapest, Hungary, 1978. Proceedings. Budapest, 1988. 178-185p.
- DEDECEK, R.A. Efeito das perdas e deposições de camadas de solo na produtividade de um latossolo vermelho escuro do cerrado. *R. Bras. Ci. do Solo*, 11:323-328, 1987.

- 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 Queirós. 1995. 265p. (Tese de Doutorado)
- DEMATTÉ, J.A.M. & LEITE, A.T.A.B. Efeito da matéria orgânica e ferro nos dados espectrais de solos arenosos e argilosos da região de Bauru, SP. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., Piracicaba, 1998. Resumos. São Paulo, Universidade de São Paulo, 1998. v.1, p.516.
- DEMATTÉ, J.A.M.; AMADOR, A. & NANNI, M.R. Avaliação espectral de amostras de solos e argilo-minerais em função de diferentes níveis de hidratação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 9., Santos, 1998. Resumos. Santos, 1998. CD-ROM.
- DEMATTÉ, J.L.I.; GARCIA, G.L. & 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, 3:479-490, 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.
- DEMATTÉ, J.L.I. & MARCONI, A. A drenagem na mineralogia dos solos desenvolvidos de diabásio em Piracicaba (SP). R. Bras. Ci. Solo, 15:1-8, 1991.
- 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.; EPIPHÂNIO, J.C.; VALERIANO, M.M. & OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo. R. Bras. Ci. Solo, 20:467-474, 1996.
- FRANÇA, G.V. & DEMATTÉ, J.A.M. Parâmetros da rede de drenagem de solos da região de Iracemápolis (SP). An. ESALQ, 47:541-555, 1990.
- GROVE, C.I.; HOOK, S.J. & PAYLOR, E.D. Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers. Washington, NASA, National Aeronautics and Space Administration, 1992, 355p. (Jet Propulsion Laboratory Publication, february 1992)
- GUYOT, G.; GU, X.F.; WEISS, M. & BARET, F. Du signal satellitaire à la réflectance au sol: Problèmes direct et inverse. Photo Interp., 2:119-137, 1996.
- JACKSON, M.L. Soil chemical analysis; advanced course. Madison, Wisconsin University, 1969. 895p.
- KIEHL, E.J. Fertilizantes orgânicos. São Paulo, Ceres, 1985. 492p.
- LAL, R. Soil erosion problem on Alfisols in western Nigeria and their control. I badan, Inst. Tropical Agr., 1976. 208p. (Monograph, 1)
- LATZ, R.A.; WEISMILLER, G.E.; van SCOTOC & BAUMGARDNER, M.F. Characteristic variations in spectral reflectance of selected eroded alfisols. Soil Sci. Soc. Am. J., 45:1130-1134, 1984.
- LEMOS, 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.
- LINDBERG, J.D. & SNYDER, D.G. Diffuse reflectance spectra of several clay minerals. Am. Miner., 57:485-493, 1972.
- LOMBARDI NETO, F. Erosão no estado de São Paulo. NOTESALQ, 17: p.1, 1997
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. Photo Interp., 2:59-72, 1996.
- MATHEWS, H.L.; CUNNINGHAM, R.L.; CIPRA, J.E. & WEST, T.R. Application of multispectral remote sensing to soil survey in southeastern Pennsylvania. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 37:88-93, 1973.
- NICODEMUS, F.E.; RICHMOND, J.C.; HSIA, J.J.; GINS BERG, I.W. & LIMPERIS, T. Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. Washington, D.C., U. S. Department of Commerce, 1977. 52p. (NBS Monograph, 160)
- PALYLYK, C.L.; CROWN, P.H. & SAUCHYN, D.J. Temporal monitoring of agricultural soil erosion risk through integrated Landsat and GIS. In: CANADIAN SYMPOSIUM REMOTE SENSING, 14., Calgary, 1991. Proceedings. Alberta, Calgary, 1991. p.108-111.
- PANDOLFO, C.M. Correção da acidez e melhoria da fertilidade do solo. In: MANUAL de uso, manejo e conservação do solo e da água: Projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas. 2ed. R., Florianópolis, EPAGRI, 1994. p.149-163.
- PAZAR, S.E. Spectral characterization of iron oxide and organic matter in eroded soils. Purdue University, West Lafayette, IN. 1983. (Tese de Mestrado)
- PENTEADO, M.M. A bacia de sedimentação de Rio Claro, Estado de São Paulo. Geographica, 5:38-61, 1969.
- RAIJ, B. van., J.A. QUAGGIO, H. CANTARELLA, M.E.; FERREIRA, A.S.; LOPES, C.O. & BATAGLIA. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RANIERI, S.B.L. Avaliação de métodos e escalas de trabalho para determinação de risco de erosão em bacia hidrográfica utilizando sistema de informações geográficas (SIG). São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996. 128p. (Tese de Mestrado)
- SEUBERT, C.E.; BAUMGARDNER, M.R.; WEISMILLER, R.A. & KIRSCHNER, F.R. Mapping and estimating areal extent of severely eroded soils of selected sites in northern Indiana. In: MACHINE PROCESSING OF REMOTELY SENSED DATA SYMP. West Lafayette, Purdue University, 1979. 170p.
- SPAROVEK, G.; TERAMOTO, E.R.; TORETA, D.M.; ROCHELES, T.C.A. & SHAYER, E.P.M. Erosão simulada e a produtividade da cultura do milho. Rev. Bras. Ci. do Solo, 15:363-369, 1991.
- SPAROVEK, G.; van LIER, Q.J.; ALOISI, R.R. & TORRADO, P.V. Previsão do rendimento de uma cultura em solos de Piracicaba em função da erosão. R. Bras. Ci. Solo, 17:465-470, 1993.
- STONER, E.R.; BAUMGARDNER, M.R.; BIEHL, L.L. & ROBINSON, B.F. Atlas of soil reflectance properties. West Lafayette, Purdue University, 1980. 75p.
- 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 2.500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. Photo Interp., 2:77-99, 1996.
- WEISMILLER, R.A. & KAMINSKY, S.A. Application of remote-sensing technology to soil survey research. J. Soil Water Conser., 33:287-289, 1978.