

**COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE TRÊS LATOSSOLOS
ARGILOSOS DA REGIÃO DE LIMEIRA - ARARAS - S.P. EM
RELAÇÃO ÀS SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS**

PEDRO LUIZ DONZELI
Engenheiro Agrônomo, Mestre
Pesquisador
I.A. C.

Orientador: Prof. Dr. GERALDO VICTORINO DE FRANÇA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

**PIRACICABA
ESTADO DE SÃO PAULO - BRASIL
JUNHO, 1984**

À
Helena, Vanessa e Camila
Dedico

AGRADECIMENTOS

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária pela concessão de bolsa de estudos para o curso de Pós-Graduação na E.S.A. "Luiz de Queiroz".

Aos Diretores do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo e Instituto de Pesquisas Espaciais por fornecerem as condições materiais para realização desta pesquisa.

Ao Prof^o Dr. Geraldo Victorino de França do Departamento de Solos da E.S.A. "Luiz de Queiroz" pela orientação e colaboração no desenvolvimento desse trabalho.

Aos Pesquisadores do INPE, Lycia Maria Moreira Nordemann, Mário Valério Filho e Antonio Roberto Formaggio pela cooperação e valiosas sugestões.

Ao Pesquisador João Bertoldo de Oliveira da Seção de Pedologia do Instituto Agronômico do Estado de São Paulo pelas facilidades oferecidas e orientação para análises de laboratório.

Aos Pesquisadores Toshio Igue, Violeta Nagai e Joassy de Paula Neves Jorge da Seção de Técnica Experimental e Cálculo do Instituto Agronômico, pela colaboração e facilidades oferecidas para análises estatísticas.

Ao Pesquisador Francisco de Paula Nogueira e funcionárias da Seção de Fotointerpretação Girleene Francisco de Souza, Nícia Marcondes Zingra e Maria Lucia Pereira de Toledo pela colaboração prestada na elaboração do trabalho.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram os sinceros agradecimentos.

Do autor

ÍNDICE

	Página
RESUMO	vii
SUMMARY	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. <u>Sensoriamento Remoto</u>	4
2.1.1. Sensores fotográficos-Filmes	6
2.2. <u>Medidas de cores</u>	9
2.3. <u>Medidas de tonalidade ou cor em aerofotografias</u>	11
2.3.1. Densidade ótica - Transmitância	11
2.3.2. Densitometria	13
2.4. <u>Análise da resposta espectral de solos em ima- gens aerofotográficas</u>	14
2.4.1. Registros tonais	14
2.4.2. Fotografias aéreas para mapeamento de solos com destaque para tonalidade ou cor	18
2.5. <u>Análise da resposta espectral de solos em labo- ratório</u>	24
2.5.1. Propriedades espectrais de solos	24
2.5.2. Espectroscopia fotoacústica	31
2.6. <u>Efeito de características do solo na reflectân- cia espectral</u>	36
2.6.1. Cor do solo	36
2.6.2. Óxidos de ferro	38
2.6.3. Matéria orgânica	40
2.6.4. Textura e umidade	42

2.7. <u>Relações entre reflectância espectral, registros tonais e características físicas e químicas dos solos</u>	44
3. MATERIAL E MÉTODOS	49
3.1. Descrição Geral da Área Estudada	49
3.1.1. Situação	49
3.1.2. Geologia e Geomorfologia	49
3.1.3. Solos	52
3.1.3.1. Unidade Barão Geraldo (LRd) ..	54
3.1.3.2. Unidade Limeira (LE.1)	55
3.1.3.3. Unidade Mato Dentro (LV.5) ...	56
3.1.4. Características Analíticas das Unidades de Solo	57
3.1.5. Relações solos/geomorfologia	59
3.1.6. Clima	59
3.1.7. Vegetação natural e uso da terra	64
3.2. <u>Equipamentos</u>	64
3.2.1. Espectrômetro fotoacústico	64
3.2.2. Densitômetros	65
3.2.3. Estereoscópio	66
3.3. <u>Material aerofotográfico</u>	66
3.4. <u>Seleção das áreas de estudo</u>	66
3.4.1. Fatores que influenciaram a escolha da área	66
3.4.2. Métodos utilizados na seleção das glebas	68

	Página
3.5. <u>Análise densitométrica</u>	70
3.5.1. <u>Dados de densidade ótica-Transmitância</u> <u>ou Reflectância</u>	70
3.6. <u>Análise de espectroscopia fotoacústica</u>	71
3.6.1. Preparo das amostras	71
3.6.2. Espectros de absorção	71
3.6.3. Obtenção de dados	72
3.7. <u>Análise das características físicas e químicas</u> <u>dos solos</u>	73
3.7.1. Cor do solo	73
3.7.2. Óxidos de ferro livres	76
3.7.3. Matéria orgânica	76
3.7.4. <u>Análise granulométrica</u>	76
3.8. <u>Análise estatística</u>	77
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
4.1. <u>Comportamento espectral dos solos estudados</u> ..	80
4.2. <u>Relações entre cores dos solos e suas respec-</u> <u>tivas imagens aerofotográficas</u>	102
4.3. <u>Relações entre dados de reflectância do espec-</u> <u>tro fotoacústico dos solos, características fí-</u> <u>sicas e químicas e registros de tonalidade em ae-</u> <u>rofotografias</u>	105
4.4. <u>Relações entre dados de reflectância densito-</u> <u>métrica relativa dos solos, características fí-</u> <u>sicas e químicas e registros de tonalidade em ae-</u> <u>rofotografias</u>	113

	Página
4.5. <u>Relações entre as características dos solos estudados</u>	117
5. CONCLUSÕES	120
LITERATURA CITADA	123
APÊNDICES	135

COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE TRÊS LATOSSOLOS ARGILOSOS DA REGIÃO DE LIMEIRA-ARARAS - S.P., EM RELAÇÃO ÀS SUAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

AUTOR: PEDRO LUIZ DONZELI

ORIENTADOR: PROF. GERALDO VICTORINO DE FRANÇA

RESUMO

Foram realizados estudos de espectroscopia fotoacústica e densitometria de faixas espectrais em amostras de três latossolos argilosos, da região de Limeira-Araras, no Estado de São Paulo, Brasil.

Os espectros óticos de reflectância, na faixa de 450-900 nm, foram relacionados a registros tonais em imagens aerofotográficas coloridas normais e infravermelhas e a determinadas propriedades físicas e químicas desses solos.

A correlação entre os dados de reflectância do espectro fotoacústico, para determinados intervalos de comprimento de onda, com pares de variáveis selecionadas estatisticamente, através dos coeficientes de correlação simples e parcial, mostrou-se significativa.

Foram observados altos coeficientes de correlação simples entre parâmetros do solo, tais como, óxidos de ferro livre, matéria orgânica, cor e granulometria com a reflectância densitométrica relativa em amostras de solos ou registros tonais nas imagens aerofotográficas.

SPECTRAL BEHAVIOUR OF THREE FINE TEXTURED LATOSOLS FROM THE LIMEIRA-ARARAS REGION, S.P., RELATED TO ITS PHYSICAL & CHEMICAL PROPERTIES

AUTHOR: PEDRO LUIZ DONZELI
ADVISER: GERALDO VICTORINO DE FRANÇA

SUMMARY

Photoacoustic spectroscopy and spectral band densitometry studies were carried out on samples of three fine textured latosols, from Limeira-Araras region, São Paulo State, Brazil.

Optical reflectance spectra, in a wave length range from 450 to 900 nm, were related to tonal densities in normal color and color infrared aerial photographic images and selected physical and chemical properties of soils.

The relationships between reflectance photoacoustic spectra for specific wave length intervals, with statistical selected pairs of variables, through partial and simple correlation coefficients, were significant.

It was observed high simple correlation coefficients of soil parameters, as free iron oxides, organic matter, color and granulometry with relative densitometry reflectance on the soil samples or tonal densities in aerial photographic images.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem sido observado um grande desenvolvimento nas técnicas e métodos de medição da energia radiante absorvida, refletida ou emitida de feições terrestres. Através dessas técnicas, se utilizam diretamente os instrumentos sensores na caracterização dessas feições, ou se procura simular a geometria dos sensores, com o intuito de caracterizar o comportamento espectral dos alvos de interesse, relacionando-os com suas propriedades intrínsecas e dando indicação das melhores faixas do espectro para operação desses instrumentos.

Em outros casos, são utilizados métodos de laboratório, sob condições controladas, onde se tem empregado uma grande variedade de aparelhos, simulando ou não a geometria dos instrumentos sensores, com a mesma finalidade.

No caso de solos, especialmente dos solos brasileiros, tem grande interesse o conhecimento do seu comportamento espectral, principalmente quando relacionado às suas propriedades físicas e químicas, ou para conhecimento das possi-

bilidades do emprego dos diversos produtos, resultantes do sensoriamento remoto, no levantamento ou inventário desse recurso natural.

Os produtos de sensoriamento remoto avaliados neste trabalho foram as fotografias aéreas, das quais alguns critérios de fotointerpretação têm sido mais estudados e pesquisados, como a drenagem superficial e aspectos do relevo, considerados os fatores mais importantes nas relações solo/paisagem. A justificativa para esse fato reside na possibilidade de reprodução do modelo tridimensional do terreno, onde essas relações podem ser avaliadas, comparativamente, entre unidades fisiográficas diferentes.

Em nosso meio, nas últimas duas décadas, inúmeros pesquisadores têm estudado os critérios de fotointerpretação aplicados a solos. No entanto, poucos pesquisadores têm estudado a tonalidade ou cor, como resposta espectral de solos em fotografias aéreas.

Sendo as cores em aerofotografias afetadas por uma série de fatores técnicos, meteorológicos e do terreno, são grandes os problemas de metodologia para aquisição de dados. O uso mais eficiente de fotos coloridas na pesquisa de solos poderá ser feito, quando baseado numa análise detalhada da cor ou de dados de densidade ótica.

Muitas técnicas modernas de sensoriamento remoto, especialmente as imagens orbitais, de "scanner" e fotos multiespectrais, são capazes de gravar pequenas diferenças em

reflectância espectral, em diversas faixas do espectro eletro-magnético, conferindo grande importância a esse critério.

No presente trabalho, amostras de três tipos, de latossolos argilosos foram estudadas em laboratório por espectroscopia fotoacústica, com a finalidade de se obter características discriminativas desses solos cujos elementos de fotointerpretação convencional são muito semelhantes.

Paralelamente, os espectros óticos-acústicos obtidos foram relacionadas com as imagens aerofotográficas desses solos, em fotografias coloridas normais e infravermelhas.

Essa resposta espectral imageada, assim como os espectros de absorção e reflectância, foram relacionados entre si e a determinadas características físicas e químicas desses solos, cuja semelhança dos elementos que compõem a sua paisagem, dificulta sua discriminação nos trabalhos de levantamento, conforme pesquisa realizada anteriormente por DONZELI (1979).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sensoriamento Remoto

A energia eletromagnética refletida ou emitida de materiais e fenômenos naturais ocorrentes na superfície da terra é altamente variável em função da alteração imposta pelas condições do meio ambiente e inerente às características intrínsecas desses materiais que compõem a cena terrestre. Porém, os fenômenos de absorção, reflexão e emissão dependem sobretudo da energia incidente, que provém do sol; como fonte natural mais importante, conforme comenta CARROLL (1973b).

O sensoriamento remoto abrange o conjunto de técnicas, através das quais, torna-se possível quantificar e qualificar, à distância, a energia que provém desses materiais e que constitui uma de suas características próprias, influenciada por fenômenos naturais diversos e pela sua composição física e química.

A energia eletromagnética, quer provenha de fontes naturais ou artificiais, possui um espectro de emissão ou reflexão com características próprias das ondas eletromagnéticas, como energia, comprimento de onda e frequência.

O espectro eletromagnético é composto de diferentes radiações, tais como, raios cósmicos, raios gama, raios X, ultravioleta, visível, infravermelho próximo, infravermelho termal, microondas, televisão e ondas de rádio.

Conforme CARROLL (1973 b), os raios cósmicos têm o mais curto comprimento de onda e a mais alta frequência, enquanto que as ondas de rádio têm o mais longo comprimento de onda e a mais baixa frequência.

A região do visível, que se estende de 380 a 780 nanômetros, é a faixa sensorizada pelo olho humano.

A Tabela 1, adaptada de CARROLL (1973 b), ilustra a parte do espectro eletromagnético onde operam os sistemas atualmente usados em sensoriamento remoto.

2.1.1. Sensores fotográficos-Filmes

COLWELL (1966) classifica os sensores remotos em *passivos* e *ativos*. Dentre os diversos sensores atualmente em uso, as fotografias aéreas são consideradas sensores *passivos*, pois gravam a radiação solar que incide na terra e que é refletida para a atmosfera. Os sensores *ativos*, como o radar, geram a sua própria energia, emitindo radiação ele-

Tabela 1. Faixas de comprimento de onda usadas em sensoriamento remoto (adaptado de CARROLL (1973b)).

Região espectral	Comprimento de onda (aproximado)	Sistemas sensores
Raios gama e raios X	0,1 - 10 nm	Não usado
Ultravioleta (médio e próximo)	280 - 315 nm	"Scanner" com detectores foto multiplicadores
Visível (azul a vermelho)	380 - 780 nm	Filmes fotográficos (normais)
Infravermelho (refletivo)	780 - 1×10^3 nm	Filmes fotográficos (sensíveis ao infravermelho)
Infravermelho	1×10^3 - 1×10^6 nm	"Scanner" com detectores do infravermelho
Microondas	1×10^6 - 1×10^9 nm	Radar
Ondas de rádio	1×10^9 - 1×10^{16} nm	Não usado

tromagnética e gravando o sinal refletido.

Por outro lado, os sensores fotográficos são denominados *diretos*, pois gravam a energia refletida pelos alvos diretamente em emulsões ou filmes, através de lentes. Os sensores denominados *indiretos* são aqueles que convertem a energia detectada pelos sensores em impulsos elétricos, os quais são transformados por um tubo de raios catódicos em luz visível, que pode ser gravada em papel fotográfico. Dessa maneira, os sensores fotográficos não operam em comprimentos de onda superiores a 1000 nm.

As fotografias aéreas são ainda classificadas como sensores imageadores, pois gravam em papel fotográfico os níveis relativos de radiação de várias superfícies imageadas, na região espectral selecionada. Estes sistemas são apropriados para interpretação visual e frequentemente proporcionam boa resolução.

Os filmes são os principais elementos que detectam a energia refletida no sistema fotográfico.

HELLER (1971) classifica os filmes em *normais* e *sensíveis ao infravermelho*, que apresentam distintas curvas de sensibilidade espectral características, dentro de faixas especificadas na Tabela 1, com pequenas variações individuais. Os dois tipos de filmes podem ser coloridos ou preto-e-branco.

Conforme explicam ESTES e SIMONETT (1975), as diferenças espectrais características de diferentes cenas da

superfície da terra são registradas como diferenças de tonalidade pelos filmes fotográficos, na dependência da sua sensibilidade.

No caso dos filmes coloridos, estes registram as cores reais dos objetos, caso sejam coloridos normais, enquanto que nos filmes coloridos infravermelhos há uma troca das cores reais, devido às diferentes sensibilidades das camadas do filme.

FORSGARD e WHITTEMORE (1968) explanam sobre filmes coloridos usados em sensoriamento remoto. Enquanto os filmes preto-e-branco possuem apenas uma emulsão sensível à luz, sobre a base de acetato ou poliéster, os filmes coloridos compõem-se de três emulsões sensíveis às três cores aditivas primárias - azul, verde e vermelho.

TARKINGTON e SOREN (1963) explicam o processo da fotografia colorida: A cor percebida pelo olho humano pode ser produzida pela mistura das cores primárias. As emulsões do filme colorido respondem seletivamente a cada uma das cores primárias, porque através de reações químicas pode-se produzir pigmentos que irão absorver cada uma dessas três cores. As cores dos pigmentos correspondem às chamadas cores secundárias, ou seja, ciano que absorve o *vermelho*, magenta que absorve o *verde* e amarelo que absorve o *azul*.

Segundo HELLER (1971), o princípio de operação dos filmes coloridos é o seguinte: As três emulsões do colorido normal apresentam sensibilidade na região do azul.

Por esse motivo, há necessidade de utilizar-se um filtro amarelo entre a primeira camada e as seguintes, para impedir a sensibilização das outras duas camadas pela luz azul. No filme sensível ao infravermelho, o filtro amarelo é usado em frente à objetiva da câmara, pois a camada de emulsão sensível ao azul é substituída por outra sensível ao infravermelho; que por sua vez também é sensível à luz azul. Devido à troca de cores resultantes no colorido infravermelho em relação às cores das regiões espectrais, esse filme é também chamado *falsa-cor*. A Tabela 2 ilustra tais considerações.

Conforme MARCHETTI e GARCIA (1978), pesquisas mostraram que o olho humano é capaz de distinguir aproximadamente 2000 variações de cores em filmes coloridos, enquanto que em filmes preto-e-branco consegue-se distinguir apenas 200 tons de cinza, o que mostra a vantagem do filme colorido, pois permite a identificação de um maior número de detalhes.

2.2. Medidas de cores

AMARAL (1975), explicando a teoria das cores, comenta que a cor de um objeto exposto à luz solar, constitui uma de suas propriedades, podendo mudar de acordo com o tipo de luz que nele incide. Os objetos aparecem coloridos à luz branca porque refletem alguns de seus componentes espectrais, com maior intensidade que outros.

Tabela 2. Princípio de operação dos filmes coloridos normais e infravermelhos, segundo HELLER (1971).

Região Espectral	Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho
Sensibilidade (Pigmentos) colorido normal	Amarelo	Magenta	Ciano	---
Sensibilidade (Pigmentos) Infravermelho	---	Amarelo	Magenta	Ciano
Cor no Colorido Normal	Azul	Verde	Vermelho	---
Cor no Infravermelho	---	Azul	Verde	Vermelho

A cor é uma das propriedades de mais difícil conceituação qualitativa, desde que depende de fatores psicológicos, além de fatores físicos.

Métodos para representação gráfica das cores foram desenvolvidos por Munsell, ISCC-NBS (Inter-Society Color Council - National Bureau of Standards) e CIE (Commission Internationale de L'Eclairage), citados por RIB (1968).

A teoria das cores, exposta por STRANDBERG (1968), mostra que todas as cores podem ser obtidas pela combinação de apenas três cores primárias denominadas aditivas: vermelho, verde e azul.

As três cores aditivas primárias somadas duas a duas formam as cores subtrativas secundárias ciano, magenta e amarelo; quando somadas as três, reproduzem a luz branca. Partindo das cores secundárias pode-se também reproduzir as cores primárias, como no processo da fotografia colorida.

A cor de um objeto pode ser determinada quantitativamente por meio de espectrometria ou por densitometria, conforme exposto por RIB (1968).

DONZELI (1979) efetuou medidas de cores em amostras de solos por densitometria, utilizando densitômetros de reflexão difusa.

2.3. Medidas de tonalidade ou cor em aerofotografias

2.3.1. Densidade ótica-Transmitância

Conforme EASTMAN KODAK (1972), a densidade é

um termo convencional que expressa o quanto o filme ou imagem fotográfica absorve de um feixe de luz incidente.

A densidade ótica é uma função logarítmica, podendo ser definida como o logaritmo da razão entre a luz incidente e a luz transmitida. Assim, tem-se:

$$D = \log \frac{P_0}{P} = \log \frac{1}{T}$$

sendo (P_0), fluxo de luz incidente; (P), fluxo de luz transmitida; (T), transmitância.

SCARPACE e FRIEDERICHS (1978) explicam o conceito de densidade em imagens coloridas, que é possível ao fotointérprete determinar. Quando a densidade é avaliada através de filtros, representando uma faixa espectral que pode ser larga ou estreita, em função da transmitância espectral do filtro, ela é denominada densidade integral espectral. Assim, tem-se:

$$D(\lambda_a) = \log \frac{P_0(\lambda_a)}{P(\lambda_a)} = \log \frac{1}{T(\lambda_a)}$$

sendo que λ_a representa um comprimento de onda determinado ou uma faixa de comprimento de onda determinado. A transmitância, no caso, é relativa aos fluxos de luz incidente e transmitido, à função de transmitância do filtro e à sensibilidade relativa do densitômetro ao fluxo de luz.

2.3.2. Densitometria

As medidas de densidade ótica são úteis para caracterização quantitativa da tonalidade ou cor em aerofotografias coloridas, sendo determinadas através de *densitômetros*.

Os densitômetros são instrumentos que procedem à comparação, por meio de uma fotocélula, entre uma amostra e um padrão de densidade conhecida.

Os densitômetros podem medir a densidade especular ou difusa.

Segundo SCARPACE (1978), a densidade especular é medida quando o fluxo de luz incidente é colimado e o fluxo transmitido é medido através de pequena abertura. Em medidas de densidade difusa, a luz incidente pode ser difusa ou colimada, porém o fluxo transmitido é medido com uma tolerância angular. Os densitômetros podem também ser de transmissão ou de reflexão, conforme sejam utilizados para medidas em transparências ou cópias em papel, respectivamente. Se a luz incidente for selecionada por filtros, pode-se medir a densidade de faixas espectrais, ou densidade espectral integral em fotografias coloridas.

RIB (1968) descreve uma técnica, utilizada também por DONZELI (1979) seguindo a mesma metodologia, que permite a caracterização da cor em imagens aerofotográficas através de medidas densitométricas.

GARCIA e MARCHETTI (1977) comentam sobre a necessidade de se quantificar o critério da tonalidade ou cor em aerofotografias coloridas, através de leituras densitométricas, que independem de critérios pessoais. Esses autores argumentam que, em sua pesquisa, tanto as notações de Munsell como a caracterização da cor, não são tão esclarecedoras como os valores de densidade ótica.

LUEDER (1959) ressalta que, para a avaliação das diferenças de tonalidade em fotografias aéreas, os densitômetros são muito superiores ao olho humano, que é incapaz de discernir todas as variações de densidade registradas nas fotos.

2.4. Análise da resposta espectral de solos em imagens aerofotográficas

2.4.1. Registros tonais

A alteração espectral da radiação que incide nos diversos alvos à superfície da terra, refletindo com intensidades diferenciadas, irá caracterizar cada material pesquisado pelo sensoriamento remoto, conferindo-lhe uma identidade espectral única.

ESTES e SIMONETT (1975) comentam que as variações tonais de cores ou de densidades, constituem os registros de diferenças espectrais decorrentes da reflexão da energia incidente em diferentes objetos fotografados à superfície da Terra.

Para MONTGOMERY *et alii* (1976), com base na literatura, em fotografias aéreas deve ser usado o termo tonalidade para o brilho relativo das imagens, enquanto que, no imageamento multi-espectral deve-se usar o termo resposta espectral. A justificativa, neste caso, é que o brilho relativo na imagem pode ser decorrente de energia refletida ou emitida pelo alvo devido às suas propriedades termais, enquanto que as fotos aéreas registram apenas a energia refletida:

Para HOFFER *et alii* (1972), a tonalidade foi considerada como critério de extrema importância na interpretação de imagens de satélite e mesmo para fotos aéreas de pequena escala. À medida que são usadas escalas maiores, esse critério decresce em importância, devido aos muitos fatores que nela influem.

KOFFLER (1982) lembra que, em imagens Landsat, a tonalidade ganha ainda mais importância por refletir o comportamento espectral dos objetos em diferentes faixas do espectro eletromagnético. No imageamento multiespectral, mesmo em grandes escalas, deve-se ressaltar a importância da tonalidade quando é decorrente da emissividade dos alvos, devida às suas propriedades termais.

RICCI e PETRI (1965) analisam os fatores que podem influir na tonalidade fotográfica em um único voo, para tomada de fotografias de grande escala. Os aspectos relacionados aos materiais e às técnicas de processamento fotográfi-

co sendo constantes e estando em condições ideais, enumeram os seguintes fatores como importantes na variação da tonalidade: ângulo de incidência do sol, topografia do terreno, posição relativa da câmara fotográfica, características e condições do solo e da vegetação.

STEINER e HAEFNER (1965) ponderam que, para obter maior eficiência na quantificação da tonalidade ou cor em imagens aerofotográficas, a influência de fontes de variação deve ser minimizada, e para isso é indispensável uma padronização no processamento fotográfico. Ressaltam que um fator importante que influi na tonalidade é a iluminação heterogênea no plano focal da câmara fotográfica, causada pela variação do ângulo de reflexão solar, sendo este um fator externo de difícil controle. Recomendam a escolha de um horário de elevada altitude solar para tomada das aerofotos, evitar lentes supergrande-angulares, e restringir as medidas às partes centrais das fotos.

ESTES e SIMONETT (1975) enumeram outros fatores que influem nos valores de densidade ou tonalidade fotográfica, tais como: características da cena, tipos de filmes, filtros, efeitos sazonais e escala das imagens.

RAY (1963) ressalta que a medida da densidade ótica da imagem por meio de densitômetros, que quantifica o critério da tonalidade, é útil para comparações entre características do terreno, quando se consideram os fatores que interferem na medida, tais como: variação do ângulo de inci-

dência do sol, topografia, posição relativa da câmara fotográfica e características dos solos e da vegetação.

LUEDER (1959) separa esses fatores em três categorias:

a) Fatores do terreno: topografia, solo (umidade e matéria orgânica), rocha, vegetação;

b) Fatores técnicos: características dos materiais e equipamentos, técnicas de exposição, técnicas de processamento;

c) Fatores meteorológicos e climatológicos: neblina, nuvens, ângulo de incidência da luz solar, estação do ano.

KOFFLER (1982), trabalhando com fotografias coloridas infravermelhas e imagens Landsat para mapeamento da cobertura vegetal de uso do solo, encontrou altas correlações entre dados análogos de razões espectrais entre canais e dados densitométricos em filtros, (canal 5/canal 7); do LANDSAT (verde/vermelho), em fotos infravermelhas coloridas.

PIECH e WALKER (1974), ao descreverem um processo de calibração necessária para a transformação de dados de densidade em dados de reflectância real de objetos fotografados, justificam que as densidades óticas avaliadas por densitômetros são variáveis, tanto em função do processamento fotográfico, como do tempo de exposição da cena fotografada à luz do sol. Este, por sua vez, depende das condições meteorológicas, altura de vôo e condições de iluminação do alvo, co-

mo por exemplo, a porção da luz do sol irradiada para a atmosfera ou transmitida até o alvo.

2.4.2. Fotografias aéreas para mapeamento de solos com destaque para tonalidade ou cor

Segundo WEISMILLER e KAMINSK (1978), a intensificação da pesquisa sobre o uso de fotografias coloridas e falsa-cor para mapeamento de solos, em várias partes do mundo, se deu na década de 1960. Os resultados começaram a evidenciar que os limites entre unidades de solo poderiam ser melhor discriminados com o uso de aerofotos coloridas do que pancromáticas. No entanto, devido ao alto custo das fotografias em cores e infravermelhas coloridas, as fotografias aéreas preto-e-branco ainda são as mais úteis nos levantamentos de solos.

Para quantificação dos parâmetros tonalidade e/ou características da cor em fotografias coloridas e infravermelhas, tendo em vista mostrar as diferenças espectrais das imagens analisadas, mais especificamente diferenças entre solos, vários autores têm desenvolvido as mais diversas técnicas.

COSTA (1979), em sua revisão de literatura, coloca as fotografias aéreas como o tipo mais comum e útil dos sensores remotos, sendo que, comparada a outros sensores, tem como importantes atributos a seu favor a resolução espectral e a fácil identificação de aspectos da paisagem:

AMARAL e AUDI (1972) colocam a tonalidade fotográfica diferencial como importante critério a ser usado na fotopedologia, aliada a outros critérios de fotointerpretação, para a discriminação de unidades de mapeamento de solos.

Para CARROLL (1973a), a cor ou tonalidade como critério para interpretação de solos torna-se evidente quando são consideradas as características do solo e as associadas.

EVANS (1979), analisando imagens fotográficas de solos expostos, destacam a importância da cor como padrão de fotointerpretação, sendo que os padrões de cor são menos visíveis quando os solos se apresentam com altos teores de umidade.

Vários autores têm encontrado altas correlações entre tonalidade em aerofotos com tipos de solos diferentes e suas propriedades.

KRISTOF (1971) classificou seis diferentes assinaturas espectrais, podendo separar e delinear unidades de solo a partir de fotografias aéreas.

PIECH e WALKER (1974) argumentam que a informação fotométrica contida na cor da imagem fotográfica é uma técnica promissora para complementar a análise fisiográfica. Mudanças na densidade da imagem podem ser relacionadas à reflectância do solo e, conseqüentemente, às suas propriedades físicas.

MATHEUS *et alii* (1973), analisando imagens multiespectrais obtidas por aeronave, conseguiram bons resultados na preparação de mapas de levantamento de solos. As propriedades de reflectância da superfície de quatro glebas de solos nus foram classificadas por comparação com padrões de reconhecimento. Os mapas de distribuição espacial das classes espectrais de solos, impressos por computador, foram comparados às condições de campo.

CARNEIRO e AZOLIM (1976), analisando comparativamente imagens orbitais e fotos aéreas, concluíram que a composição colorida "falsa-cor" foi a imagem mais informativa para a finalidade em questão, pela análise da tonalidade ou cor.

MYERS (1979) destaca as vantagens das fotografias coloridas para mapeamento de solos, sendo que essas vantagens tornam-se evidentes quando são consideradas as características do solo associadas a sua cor, ou quando são usados métodos dedutivos de associação da resposta espectral de culturas associadas a solos.

CIHLAR e PROTZ (1972) relatam que os filmes coloridos gravam muitas informações específicas com respeito às unidades de mapeamento de solos e recomendam que, para a obtenção de medidas densitométricas aplicadas a solos, estas devam ser obtidas em áreas e não em secções transversais.

WESTIN e FRAZEE (1976) descrevem as características da tonalidade e cor, além de outros padrões aplica-

dos em seu programa de levantamento de solos, que lhes possibilitaram separar unidades fisiográficas que necessitaram apenas pequeno refinamento na "checagem" de campo.

EVANS (1979) salienta em sua pesquisa, que os contrastes entre solos são melhor evidenciados em aerofotografias multiespectrais nas faixas do vermelho e infravermelho próximo; e que os padrões tonais diferenciais são melhor caracterizados em aerofotografias do que em fotos terrestres, porque a luz se difunde melhor na direção vertical do que na horizontal.

DOMINGUES (1960), analisando comparativamente fotos coloridas e pancromáticas para levantamento de solos concluiu que as imagens coloridas permitiram maior precisão no delineamento de unidades de solo e ganho de tempo nesse trabalho, exigindo dos fotointérpretes apenas uma alta acuidade visual para cores. Usando as notações de Munsell, encontrou alta correlação entre cores dos solos amostrados e cor registrada nas aerofotos coloridas.

EVANS *et alii* (1976), pesquisando o uso de aerofotografias para separação e identificação de solos em Fenland, Inglaterra, concluiu que os valores de densidade de imagem são insuficientemente precisos para a determinação de propriedades específicas de solos; e que as correlações entre valores de densidade tonal e propriedades dos solos são maiores quando grandes áreas são avaliadas. Concluiu também, que a densidade tonal foi um critério muito eficiente quando

usado em conjunção com outros critérios de fotointerpretação.

CIHLAR e PROTZ (1972), trabalhando com medidas de densidades óticas sobre filmes coloridos, com a finalidade de discriminar diferentes unidades de solo, demonstraram uma sensível diferença entre negativos coloridos e um negativo preto-e-branco hipotético. Com a finalidade de avaliar a aplicabilidade de filmes coloridos e pancromáticos no mapeamento de solos, em condições similares, esses autores consideram a soma das densidades obtidas nos filtros vermelho, verde e azul como medidas equivalentes às obtidas em negativos preto-e-branco.

PIECH e WALKER (1974) argumentam que o levantamento de solos por fotointerpretação tem sido baseado na análise fisiográfica e avaliação visual das propriedades tonais; e que, embora essas técnicas tenham sido vantajosas, através de quantificação desses parâmetros o intérprete poderia avaliar melhor as propriedades dos solos com respeito ao acerto ou extensão desejada.

VALENTINE *et alii* (1971) concluíram que as fotografias pancromáticas se equivalem às coloridas e infravermelhas para mapeamento de solos de terrenos montanhosos, enquanto que a precisão aumenta significativamente de 72% para 84% a favor das fotografias coloridas normais e infravermelhas para mapeamento de solos em planícies contendo depósitos aluviais, marinhos ou deltaicos.

KUHL (1970) relata que, através de métodos quantitativos, foi possível medir a precisão na interpretação

de características do solo em fotos pancromáticas, coloridas e infravermelhas coloridas, sendo que as duas últimas mostraram-se superiores às pancromáticas. GARCIA (1975) e ANSON (1968), desenvolveram pesquisas semelhantes, confirmando esses resultados.

PARRY *et alii* (1969), usando fotografias coloridas em uma pesquisa para levantamento de solos, que apresentavam diferentes classes texturais, demonstraram a superioridade das fotografias coloridas sobre as pancromáticas na diferenciação entre séries de solo e na distinção entre variações no teor de umidade e matéria orgânica. Quanto às cores, nem sempre obtiveram a exata correspondência entre as cores dos solos no campo e as cores examinadas em cópias em papel dos negativos originais.

ANSON (1970), após testes comparativos entre fotografias pancromáticas e coloridas, adverte sobre a maior complexidade dos problemas relacionados com os métodos a serem usados na obtenção dos dados, quando se utilizam fotografias coloridas.

EVANS (1979) comenta que as relações entre tonalidade fotográfica e propriedades físicas dos solos são únicas para cada localidade, devido ao grande número de fatores variáveis dos solos responsáveis por suas respostas espectrais.

PIECH e WALKER (1974) explicam como informações detalhadas de umidade e textura do solo podem ser obti-

das de imagens fotográficas através da análise da informao fotométrica da imagem. Esses autores obtiveram medidas de densidades tica e as transformaram em valores de reflectância real registrada nas imagens fotográficas através de uma calibrao das medidas. Recomendam que a interpretao fotométrica deve ser feita através de razões espectrais entre reflectância do vermelho e azul.

CIHLAR e PROTZ (1972) realizaram pesquisa, com o propósito de determinar se os filmes coloridos contm a informao de resposta espectral possível de ser usada na separao de unidades de solo. Efetuaram medidas densitométricas ao longo de seces transversais sobre negativos coloridos. Esses dados foram submetidos a uma análise discriminatória. Os resultados demonstraram que os negativos coloridos são capazes de gravar informaes, as quais poderão ser usadas na separao de unidades de solos.

MACE (1980) conseguiu mapear, com grande precisão, solos em nível de séries por análise digital microdensitomtrica, em solos preparados para plantio, em Wisconsin (USA).

2.5. Análise da resposta espectral de solos em laboratório

2.5.1. Propriedades espectrais de solos

A resposta em reflectância espectral de solos, assim como de plantas, deve conter informaes concentradas

em uma faixa espectral relativamente estreita, definida pelas propriedades de absorção da luz pelos seus constituintes, átomos e moléculas.

Essa informação torna-se de grande valor no sensoriamento remoto, na discriminação das melhores bandas espectrais para a finalidade em questão.

CROWN e PAWLUK (1974) sustentam a afirmativa de que o solo, tanto em condições naturais como em amostras no laboratório, tem uma resposta espectral característica e bem definida, estando estreitamente correlacionada às suas propriedades físico-químicas, como foi comprovado por inúmeros pesquisadores.

Obukhov, citado por MONTGOMERY *et alii* (1976), trabalhando em laboratório, determinou coeficientes de reflexão relativa na parte visível do espectro (0,4 a 0,75 μ m), expressando a razão entre a reflexão do objeto estudado e a reflexão de uma superfície absolutamente branca (padrão). O estudo foi conduzido com um espectrômetro de laboratório e com uma série de filtros de banda larga. Concluiu, que nessas condições, para se obter bons resultados em laboratório, o solo amostrado deve ser seco ao ar e passado em peneira de malha de 1mm de diâmetro. Além dessa técnica foi usada uma esfera integradora para medir a reflectância sob diversos ângulos, simulando os registros em condições naturais. A região do vermelho foi a que se mostrou mais eficiente na caracterização dos solos.

MAY e PETERSEN (1975) relatam que mapas gerados por computadores, usando as assinaturas espectrais obtidas em laboratório e através de dados de "scanner", montado em aeronave, foram similares a mapas de levantamento de campo por processos tradicionais. Aproximadamente 90% de acerto foi obtido entre mapas produzidos por assinaturas espectrais de solos sensoriados pelo "scanner" em comparação com suas reflectâncias espectrais obtidas em laboratório.

MONTGOMERY *et alii* (1976) discutem a influência do tamanho das partículas do solo na reflexão da luz em condições de laboratório. A reflexão difusa da superfície dos agregados esféricos, sendo ideal em relação a agregados de tamanho irregular, que refletem menos luz, que se extingue entre eles. O diâmetro dos agregados parece não ter influência na reflectância total, porém esse autor recomenda que se padronize a amostra em peneira de malha de 1mm de diâmetro.

MONTGOMERY *et alii* (1976) não recomendam o uso de vidro sobre as amostras, principalmente para determinação de cor do solo, uma vez que pode alterar os valores em relação aos valores Munsell, guardando com eles uma relação constante.

WEISMILLER e KAMINSK (1978) afirmam que, em geral, os solos são caracterizados por uma alta resposta espectral no infravermelho termal, uma relativamente menor resposta no infravermelho reflectivo e uma variada resposta nas

porções visíveis do espectro.

KRISTOF e ZACHARY (1971) obtiveram resultados promissores no reconhecimento de padrões de solos da região de Indiana, USA, pela análise de dados espectrais mediante o uso de computador. Usaram doze faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético, desde 400 a 2600 nm, obtendo assinaturas espectrais de amostras de séries de solo já conhecidas. As séries de solo puderam ser facilmente identificadas e discriminadas, quando a variação entre elas foi maior que dentro da própria série.

CIPRA *et alii* (1980) efetuaram medidas de propriedades espectrais de solos com espectrorradiômetro. Simultaneamente, mediram a radiância em imagens do satélite Landsat dos solos desprovidos de vegetação. A radiância nas imagens Landsat e os valores de reflectância estavam altamente correlacionados em todas as bandas do Landsat.

A análise de variância mostrou que dezesseis unidades de mapeamento, consistindo de onze séries de solo, puderam ser separados em cinco grupos de reflectância espectral distintos, com base na cor superficial desses solos e em quatro grupos com base em outras características diferenciadoras das séries.

Segundo FORMAGGIO (1983), o primeiro pesquisador a caracterizar curvas de reflectância espectral de solos, organizando-as segundo as suas formas, foi CONDIT (1970), que as enquadrou em três tipos gerais no intervalo de 0,32 a 1,0 micrômetro.

STONER e BAUMGARDNER (1981), analisando 485 amostras individuais da camada superficial de solos de várias partes do mundo, selecionaram cinco diferentes curvas de reflectância espectral de solos minerais, com base no teor de matéria orgânica e óxidos de ferro, como características diferenciais. Sugerem assim, mais dois tipos de curvas de reflectância em adição às descritas por CONDIT (1970). Uma das modificações sugeridas é a que caracteriza as curvas de reflectância de solos amostrados em Londrina, Paraná, Brasil, em solos "Typic Haplorthox", apresentando altos teores de ferro, baixos teores de matéria orgânica e textura fina. Essa curva de reflectância é a única que apresenta como característica uma inflexão de declividade, passando a decrescer por volta dos 750 nanômetros. Este tipo de curva não mostrou as bandas de forte absorção da água por volta dos 1450 nanômetros e 1950 nanômetros que outros tipos apresentaram, Fig. 1 (e). Porém, apresentam a faixa característica de absorção de ferro férrico entre 800-900 nm, descrita por STONER *et alii* (1980).

Na Fig. 2 é apresentada a curva de reflectância de STONER e BAUMGARDNER (1981), relativa ao trecho compreendido entre 400 e 1000 nanômetros, onde se pode observar a tendência decrescente após 700 nanômetros e a faixa de absorção de ferro próximo a 900 nanômetros.

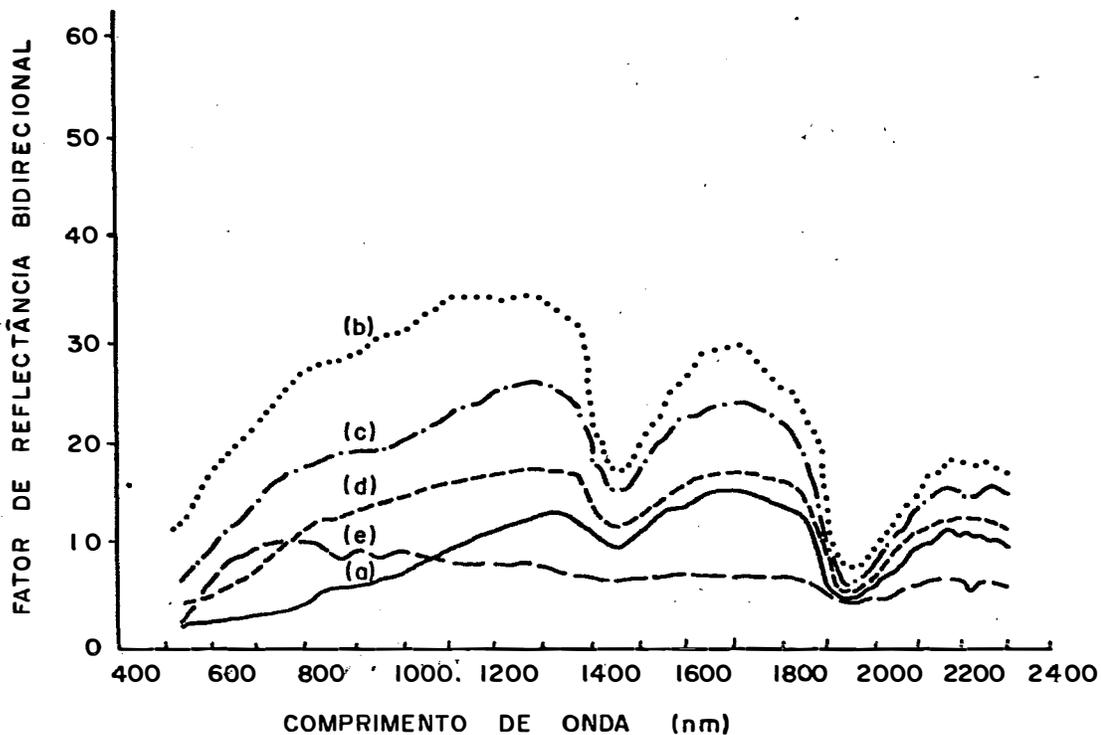


Fig. 1 - Espectro de reflectância de amostras de horizonte superficial de 5 solos minerais (a) alto teor de m.o. >2%, textura moderadamente fina (b) baixo teor de m.o. e médio teor de ferro Fe_2O_3 (1-4%) (c) baixo teor de m.o., médio teor de ferro (d) alto teor de m.o., textura moderadamente grosseira (e) alto teor de ferro, textura fina. Extraído de STONER e BAUMGARDNER (1981).

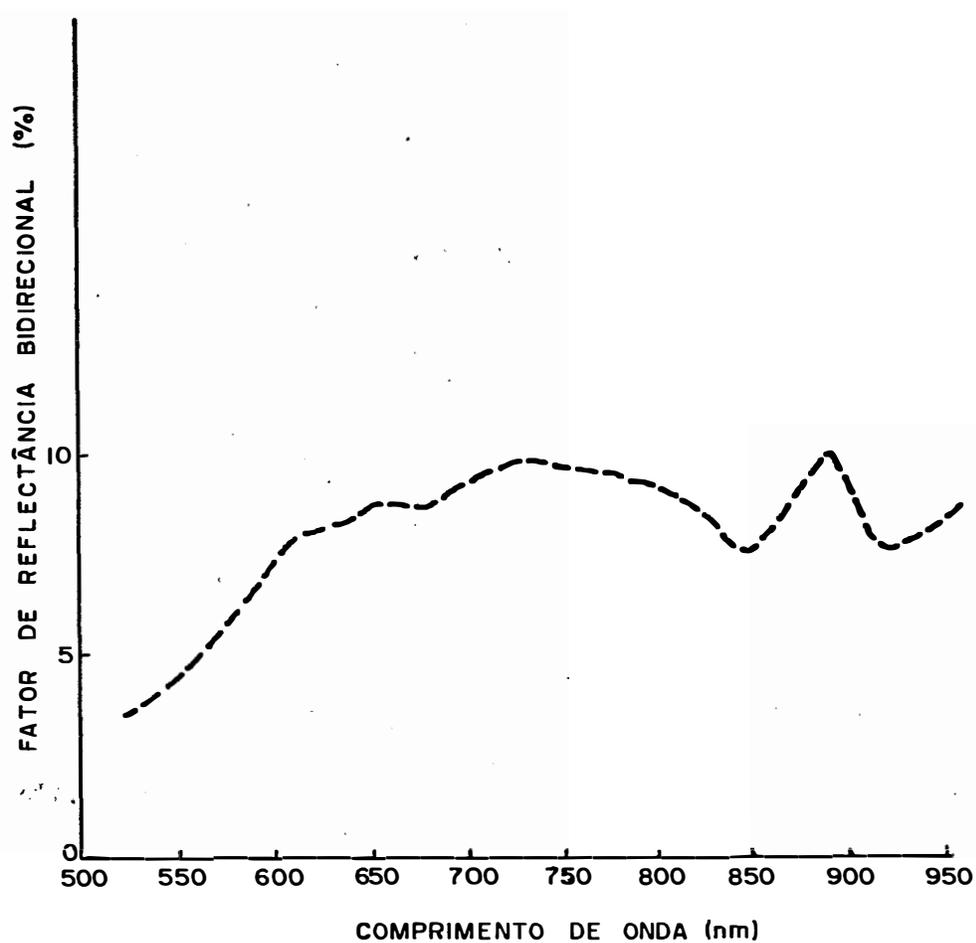


Fig. 2 - Espectro de reflectância de amostras de horizontes superficiais de solos com altos teores de ferro, baixos teores de matéria orgânica e textura fina, entre 550-950 nm. (Typic Haplortox). Adaptado de STONER e BAUMGARDNER (1981).

2.5.2. Espectroscopia Fotoacústica

De uma maneira simplificada, o processo de funcionamento do espectrômetro ótico-acústico é descrito por ROSENCWAIG (1977). Fig. 3.

Na espectroscopia fotoacústica de sólidos as amostras a serem estudadas são colocadas dentro de uma célula fechada contendo um gás, no caso ar, e um microfone ultrasensível. A amostra é então iluminada com uma luz monocromática oscilante. A energia absorvida pela amostra é transformada em energia de vibração, a qual é transferida às moléculas do ar que entram em movimento produzindo som. O sinal recebido pelo microfone, resultante do som produzido pela vibração do ar, é processado por um amplificador. A potência desenvolvida é gravada como uma função do comprimento de onda da luz incidente. Dessa maneira, o espectro ótico-acústico obtido corresponde ao verdadeiro espectro ótico de absorção das amostras.

ROSENCWAIG (1977) argumenta que uma das principais vantagens da espectroscopia fotoacústica (E.F.) é que ela permite obter um espectro similar ao espectro ótico de absorção, de qualquer tipo de material sólido ou semi-sólido, podendo ser cristalino, em forma de pó ou amorfo. Esta capacidade é baseada no fato de que apenas a luz absorvida é convertida em som. O espalhamento de luz, que representa um obstáculo nas técnicas convencionais de espectroscopia de vários

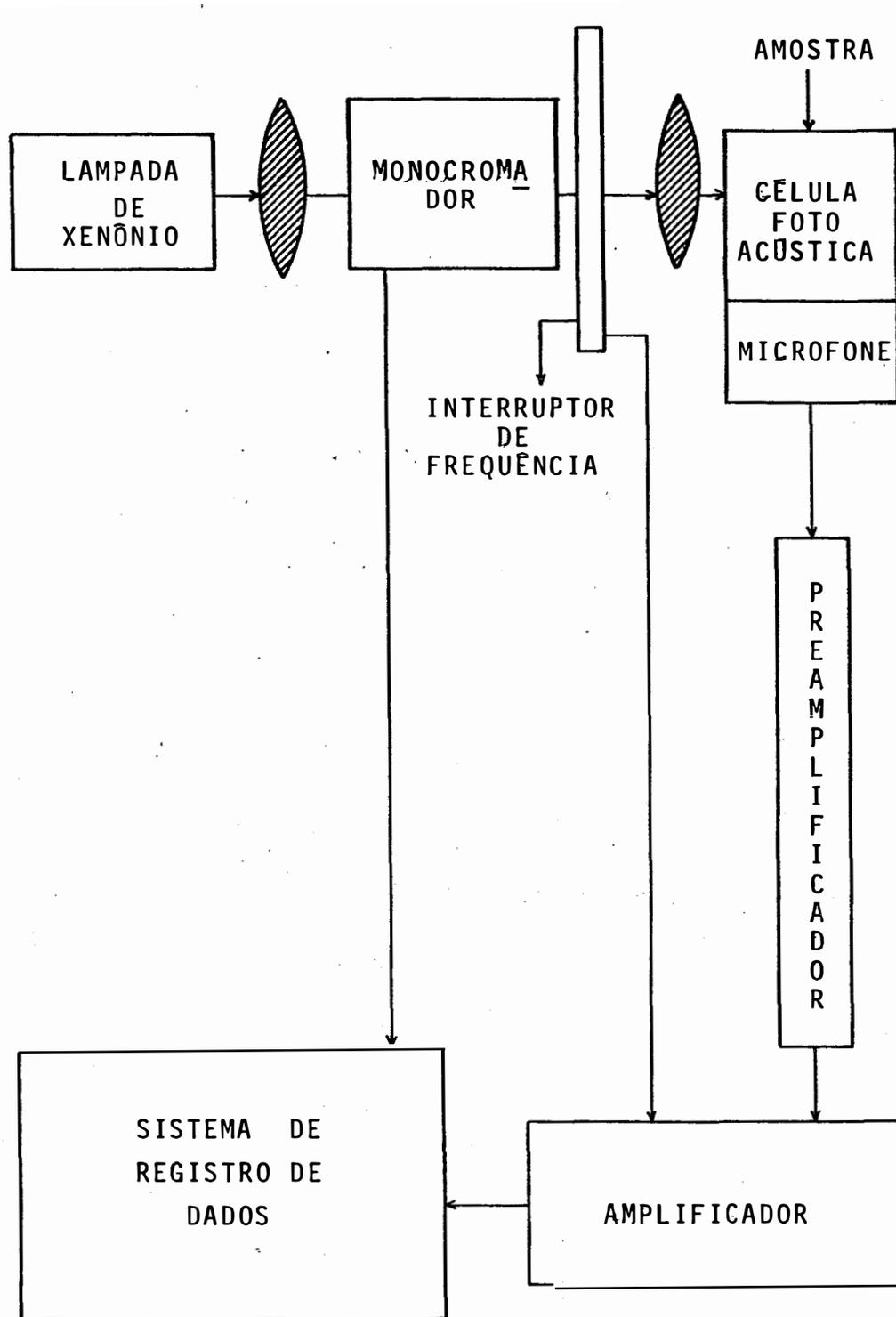


Fig. 3 - Representação esquemática do espectrômetro fotoacústico, Rosencwaig (1977).

tipos de materiais sólidos, no caso da E.F. não constitui problema. Além disso, provou-se experimentalmente que bons dados da absorção ótica podem ser obtidos com a técnica da E.F. de materiais completamente opacos à luz transmitida.

Aplicações importantes em pesquisa e análise de sólidos e semi-sólidos, orgânicos, inorgânicos e biológicos, como no caso dos solos, são descritos por ROSENCWAIG (1977).

MOREIRA-NORDEMANN *et alii* (1983) obtiveram, em laboratório, espectros fotoacústicos ou espectros óticos de absorção na faixa de 200 a 2000 nanômetros, de vários tipos de solos, a fim de ser estudado o comportamento termal dessas amostras em função da radiação incidente. A correlação entre o espectro fotoacústico e a absorção de energia solar pela superfície do terreno foi estabelecida para intervalos de comprimento de onda correspondentes. Os resultados obtidos nesse trabalho sugerem a possibilidade de se usar a espectroscopia fotoacústica como um novo método, de análise espectral, aplicada a solos, auxiliando na seleção das faixas espectrais para definição de canais nos instrumentos sensores. Nesse trabalho foi provada a importância do teor de matéria orgânica no comportamento termal do solo. Solos ricos em matéria orgânica (carbono total), tendem a exibir altas temperaturas em função da energia incidente. Em todas as amostras examinadas, a absorção de energia foi relativamente grande na faixa espectral de 260 a 400 nm e maior que nos comprimentos

de onda do visível e infravermelho próximo.

Também BOWERS e HANKS (1965) fazem considerações sobre as elevadas temperaturas de solos escuros. Esse fato é atribuído à grande absorção de energia solar radiante que esses solos apresentam.

MOREIRA-NORDEMANN *et alii* (1983) apresentam em seu trabalho dois tipos principais de espectros fotoacústicos. As amostras ricas em matéria orgânica, que apresentam um pico de absorção em torno de 300 nm, Fig. 3 (a), e as ricas em ferro, onde se pode observar um patamar entre 260 e 540 nm, Fig. 3 (b), e faixa de absorção na região espectral do laranja e vermelho.

Esses autores observaram também uma correspondência entre a cor dos solos, teor de matéria orgânica e Fe_2O_3 , com a intensidade do sinal fotoacústico. O solo de coloração mais escura, que também é o mais rico em ferro e matéria orgânica, foi o que apresentou o mais forte sinal fotoacústico e exibiu a mais alta temperatura.

Outra observação interessante é que, ao comparar os dados de intensidade do sinal fotoacústico com os teores de Fe_2O_3 e matéria orgânica, a autora e colaboradores notaram que as amostras ricas em matéria orgânica dão um sinal fotoacústico mais intenso do que aquelas onde há um teor comparável de Fe_2O_3 , porque a matéria orgânica absorve maior quantidade de energia.

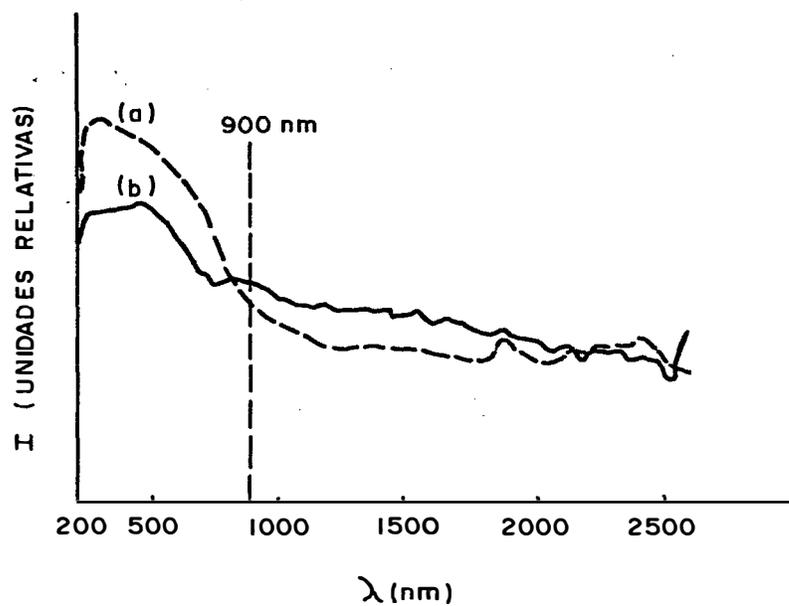


Fig. 4 - Espectros fotoacústicos de amostras de horizontes superficiais de solos ricos em matéria orgânica (a) e ricos em Fe_2O_3 (b). Extraído de MOREIRA-NORDEMANN et alii (1983).

2.6. Efeito de características do solo na reflectância espectral

2.6.1. Cor do solo

STONER *et alii* (1980) advertem que, ao se comparar as cores correlacionadas às tabelas com a reflectância espectral dos solos, deve-se levar em consideração que a faixa de comprimento de onda da percepção humana da reflectância visível estende-se de 380 a 780 nanômetros, enquanto que as medidas espectrais podem se estender por uma faixa variável, bem maior. No entanto, a cor pode ser resultante de intensas absorções fora da região do visível, estendendo-se essa influência para essa região. Daí a importância de se examinar uma faixa mais larga do espectro eletromagnético para perfeita caracterização das propriedades espectrais do solo correlacionadas à sua cor.

KRISTOF *et alii* (1980) reafirmam essas observações, recomendando porém a faixa 580 a 610 nanômetros da região do visível como extremamente útil em sua pesquisa para caracterização quantitativa da cor do solo.

STONER e BAUMGARDNER (1981) ponderam que a classificação americana moderna ou "Soil Taxonomy" (Soil Survey Staff, 1975), utiliza a reflectância na faixa do visível ou cor do solo, como uma característica diferenciadora para muitas classes, sendo uma parte essencial na definição de certos horizontes diagnósticos.

COSTA (1979) adverte que a cor do solo, conforme é avaliada pelos pedólogos, não é precisa e sua utilidade poderia ser muito aumentada, para correlações com outras propriedades do solo, quando determinada através de espectrometria.

COSTA (1979) relaciona os fatores que podem influenciar as leituras visuais de cor, como hora do dia, ângulo do sol, nebulosidade e defeitos da visão. As leituras de laboratório também estão sujeitas a erros, porém sendo padronizados os procedimentos, esses erros tendem a ser menores.

Obukhov e Orlov, citados por MONTGOMERY *et alii* (1976), MYERS e ALLEN (1968), VALERIO FILHO *et alii* (1976) demonstraram em seus estudos que os solos possuem reflectividade espectral característica, altamente correlacionada à sua cor e concluíram que a região do vermelho e infravermelho do espectro são as mais favoráveis para essa caracterização.

COSTA (1979) estabeleceu equações de regressão baseadas nos componentes da cor dos solos para estimar outras propriedades dos solos. As propriedades do solo mais significativas, relacionadas à sua cor, são a matéria orgânica, teor de argila e óxidos de ferro.

CIPRÀ *et alii* (1980) relatam em sua pesquisa que as cores dos horizontes superficiais do solo influenciaram as características espectrais medidas. Os resultados dessa pesquisa sugerem que, em situações onde a cor da superfície dos solos está altamente correlacionada com outras carac-

terísticas, há possibilidade de se detectar diferenças entre solos através de suas características espectrais.

McKEAGUE *et alii* (1971), trabalhando com solos do Canadá, encontraram alta correlação entre o "valor" da cor e os teores de matéria orgânica. Esses autores relatam que essa característica pode ser estimada por análise de regressão a partir do parâmetro "valor", que tem um componente reflectivo facilmente mensurável por espectrometria.

Também MONTGOMERY *et alii* (1976) apresentam uma correlação significativa ao nível de 1% entre "matiz" e a porcentagem de Fe_2O_3 e entre "valor" e porcentagem de argila ou teor de matéria orgânica. Estes autores não observaram relação significativa entre "croma" e as características estudadas.

CARROLL (1973) afirma que a cor, na interpretação de solos em imagens aerofotográficas, pode ser muito importante quando são usados métodos dedutivos de associação de condições das culturas com as características dos solos.

Também CROWN e PAWLUK (1974) fazem essa afirmativa, concluindo que existe a possibilidade de se usar o vigor das plantas cultivadas, como indicador de características de sub-superfície, principalmente se os dados forem obtidos quando as plantas atingirem seu vigor máximo.

2.6.2. Óxidos de ferro

Segundo STONER *et alii* (1980), faixas de ab-

sorção de Fe_2O_3 podem ser vistas em certas curvas de reflectância por volta dos 700 e 900 nm. Largas faixas nesses comprimentos de onda frequentemente ocorrem em solos com altos teores de ferro, enquanto em solos relativamente pobres em ferro pode ser observada uma faixa mais estreita de absorção aos 900 nanômetros.

Karmanov, citado por COSTA (1979), concluiu que o grau de hidratação dos hidróxidos do solo está relacionado à reflexão da luz na porção visível do espectro, sendo a reflectância diretamente proporcional à hidratação.

De acordo com STONER *et alii* (1980), diferentes formas de óxidos de ferro estão associadas às cores vermelhas e amarelas dos solos. Os dados espectrais, em seu trabalho, indicam que a absorptância no infravermelho próximo está associada à cor dos solos com altos teores de ferro.

COSTA (1979) cita os oxissóis de regiões tropicais que tendem a tornar-se mais vermelhos à medida que aumentam os teores de óxidos de ferro.

Segundo ADRIEN *et alii* (1982), tanto os óxidos de ferro como a mineralogia da fração argila constituem parâmetros adicionais que afetam a reflectância espectral dos solos. Argilas dos tipos montmorilonita e caulinita exibem diferentes propriedades espectrais. Nos solos onde predominam altos teores de ferro parece haver um decréscimo geral na reflectância espectral a partir dos 750 nm, mas que não pode ser atribuído a um único fator, uma vez que essa característica

ocorre em associação com outras características desses solos.

MONTGOMERY *et alii* (1976) também afirmam que a significância dos óxidos de ferro na reflectância aumenta com o aumento do comprimento de onda no espectro, particularmente nas regiões do visível e infravermelho próximo.

MATHEWS *et alii* (1973) relatam que altos teores de óxidos de ferro reduzem a intensidade de reflectância especialmente na faixa 500 - 1200 nanômetros.

Obukhov e Orlov, citados por MONTGOMERY *et alii* (1976), encontraram coeficientes de reflexão de solos na região 500 - 640 nm inversamente proporcionais aos teores de óxidos de ferro, sendo este um dos principais fatores correlacionados à reflexão espectral da superfície dos solos.

2.6.3. Matéria Orgânica

A influência da matéria orgânica nas propriedades dos solos é bem conhecida e estudada. Além de influenciar as cores dos solos, a matéria orgânica está diretamente relacionada à capacidade de troca catiônica, retenção de umidade, estrutura, erodibilidade e também à reflectância espectral dos mesmos. Como demonstrado por diversos autores, entre os quais BOWERS e HANKS (1965), PAGE (1974), STONER e BAUMGARDNER (1981), AL-ABBAS *et alii* (1972), o teor de matéria orgânica está inversamente correlacionado à reflectância espectral.

BAUMGARDNER *et alii* (1970), através da análise digital de dados multiespectrais do "scanner", delinearam mapas de classes de solos com diferentes teores de matéria orgânica. Uma análise de regressão linear entre teores de matéria orgânica e resposta espectral de 200 amostras superficiais dos solos estudados mostrou um coeficiente de correlação significativo, $r = (-0,72)$.

ADRIEN *et alii* (1982) citam um trabalho de Stoner e Baumgardner de 1979, onde estes autores indicam que a região do verde no espectro eletromagnético, compreendida entre os comprimentos de onda 0,52 - 0,62 micrômetros, mostra altas correlações com o teor de matéria orgânica de 481 amostras de solos, pertencentes a diferentes classes taxonômicas.

Conforme BAUMGARDNER *et alii* (1970), o teor de matéria orgânica influencia acentuadamente a reflectância espectral dos solos. Em solos com altas porcentagens de matéria orgânica (maiores que 2%), há um mascaramento do efeito de outras propriedades na reflectância espectral.

STONER e BAUMGARDNER (1981) complementam essa afirmação, ressaltando que, em solos minerais, apenas solos com altos teores de Fe_2O_3 (maiores que 4%), poderão haver mascaramento dos efeitos de altos teores de matéria orgânica.

MOREIRA-NORDEMANN *et alii* (1983) caracterizaram espectros fotoacústicos de amostras de solos ricos em matéria orgânica, que apresentaram um pico de absorção, bastan-

te proeminente em torno dos 300 nm.

Segundo ADRIEN *et alii* (1982), apesar dos vários trabalhos já conduzidos, mostrando a influência da matéria orgânica nas propriedades espectrais dos solos, ainda existem dúvidas, e diferentes opiniões permanecem com respeito à região do espectro eletromagnético mais adequada para medir as propriedades espectrais de solos com diferentes teores de matéria orgânica.

2.6.4. Textura e umidade

Tem sido observado que a diminuição no diâmetro das partículas do solo causa um correspondente aumento na sua reflectância, principalmente em solos arenosos.

Segundo STONER *et alii* (1980), esse fato é explicado, possivelmente, pela formação de uma superfície lisa, com poucos vazios, a qual poderia vedar a entrada de luz. O inverso acontece com solos argilosos e de textura média o que pode ser explicado talvez pela capacidade desses solos reterem maiores teores de umidade e também estarem associados com matéria orgânica, especificamente no caso dos solos argilosos.

KRISTOF *et alii* (1980) relatam que a textura do solo pode ser melhor diferenciada nas faixas 0,73-0,76 micrômetros e 0,88-0,90 micrômetros; sendo que as faixas de 2,07-2,09 e 2,16-2,19 micrômetros mostram-se eficientes na quantificação do teor de argila dos solos, quando estes pos-

suem menos de 20% de argila e menos de 2% de matéria orgânica.

Parece haver uma concordância geral entre os autores, como BOWERS e HANKS (1965), MYERS e ALLEN (1968), HOFFER e JOHANSEN (1969), PARKS e BODENHEIMER (1973), que para um aumento no teor de umidade, mantendo-se os demais fatores constantes, há um correspondente decréscimo na reflectância espectral dos solos, em todos os comprimentos de onda.

Quanto à influência do teor de umidade na reflectância, vários autores como BOWERS e HANKS (1965), MONTGOMERY (1974), têm afirmado que este não influencia a forma das curvas espectrais, e sim a variação de amplitude da reflectância.

COSTA (1979) cita uma pesquisa realizada em 1970 no LARS (Laboratory for Applications of Remote Sensing da Universidade de Purdue), em que a reflectância espectral de solos arenosos e argilosos foi medida em laboratório para mostrar os efeitos do teor de umidade na reflectância espectral. Em ambas as categorias de solos observa-se que a reflectância diminui com o aumento da umidade no solo. Notou-se também que as curvas de solos argilosos mantêm a mesma configuração com a mudança no teor de umidade, o que não acontece com solos arenosos.

MATHEWS *et alii* (1973) relatam que o tipo de argila influencia a forma e a intensidade da curva de reflectância em toda a faixa estudada 500 - 2600 nanômetros.

Segundo diversos autores, como STONER *et alii* (1980), VANDERBILT *et alii* (1980), KRISTOF *et alii* (1980), ADRIEN *et alii* (1982), CIPRA *et alii* (1971), as curvas espectrais da maioria dos solos apresentam faixas de forte absorção de água em 1,45 e 1,95 micrômetros, o que sugere uma específica locação das moléculas de água em sítios determinados.

ADRIEN *et alii* (1982) citam o trabalho de Stoner e Baumgardner de 1980, onde estes concluíram que a região do espectro eletromagnético que apresenta maiores correlações com a umidade do solo corresponde à faixa de 2,08 a 2,32 micrômetros.

PETERSON *et alii* (1979) mostram também a possibilidade de determinação do teor de umidade de solos a partir da sua resposta espectral, através de análise de regressão.

2.7. Relações entre reflectância espectral, registros tonais e características físicas e químicas dos solos

Muitas propriedades físico-químicas dos solos estão intimamente correlacionadas, o que muitas vezes permite, através da medida de um ou mais parâmetros, estimar-se a quantidade ou características de outros.

Conforme comentam MONTGOMERY *et alii* (1976), equações de regressão têm sido estabelecidas para a determinação da CTC de certos solos em função dos teores de argila e

matéria orgânica. A cor está intimamente relacionada ao conteúdo de ferro total e tem sido expressa como uma função do conteúdo de ferro, matéria orgânica, pH e tipo de argila, tornando-se cada vez mais, com os avanços da tecnologia de sensoriamento remoto, um critério muito significativo na discriminação de solos.

Numerosos estudos têm descrito a contribuição relativa de parâmetros do solo tais como matéria orgânica, umidade, composição granulométrica, estrutura do solo, óxidos de ferro, mineralogia, cor e CTC, no comportamento espectral dos solos. Dentre outros, citam-se os trabalhos de BOWERS e HANKS (1965), COSTA (1979), HOFFER e JOHANNSEN (1969), MYERS (1979), MATHEWS *et alii* (1973), MONTGOMERY *et alii* (1976), MYERS e ALLEN (1968), PETERSON *et alii* (1979), PLANET (1970), STONER e BAUMGARDNER (1981).

Na última década, muitos estudos têm sido conduzidos para reconhecimento de padrões de resposta espectral característica de solos, com medidas em laboratório, no campo e em imagens aerofotográficas e de satélites. Os resultados têm sido bastante promissores e as unidades de solo foram discriminadas sempre que as variações entre elas são maiores do que dentro das próprias unidades.

Os trabalhos de diversos autores como PAGE (1974), MONTGOMERY *et alii* (1976), STONER e HORVATH (1978), CIPRA *et alii* (1971), evidenciam que algumas características como o teor de matéria orgânica, Fe_2O_3 e granulometria constituem-se em pa-

râmetros altamente correlacionados à reflectância espectral e aos registros tonais nas imagens.

CIHLAR e PROTZ (1973), estudando as relações entre as características físicas e químicas dos solos e sua resposta espectral, concluem que distintos grupos de unidades de mapeamento de solos foram definidos com base no "valor" de Munsell, matéria orgânica e granulometria, mas nem todas as unidades de solo puderam ser discriminadas. Seus resultados demonstraram que os solos não podem ser mapeados com precisão com base apenas na sua resposta espectral, mas que estas devem constituir uma informação adicional, juntamente com outros critérios.

EVANS *et alii* (1976), trabalhando com solos desprovidos de vegetação, encontraram altas correlações com o teor de umidade dos solos e foto-tonalidade. A cor e o teor de umidade foram relacionados ao teor de matéria orgânica no solo. O aumento do teor de matéria orgânica estava associado ao aumento na retenção de umidade e cores mais escuras. Nesse caso, o teor de umidade foi consequência do maior teor de matéria orgânica.

VALERIO FILHO *et alii* (1976), quantificando as respostas espectrais de diversos solos através de medidas de densidade, conseguiram resultados que permitiram a caracterização de três grupos de solos: a) Latossolo Roxo; b) Latossolo Vermelho Escuro fase arenosa e c) Areias Quartzosas. Concluíram que a textura mostrou-se mais importante que a estru-

tura do solo, em termos de reflectividade espectral na região do infravermelho.

FORMAGGIO (1983), estudando o comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo, concluiu que os Latossolos Roxos e Vermelhos Escuros são espectralmente separáveis do Latossolo Vermelho-Amarelo e Podzólico Vermelho Amarelo, porém não puderam ser separados entre si. Entre os parâmetros que influenciaram a reflectância dos solos destacam-se a cor e os conteúdos de ferro e matéria orgânica. A umidade foi importante nas condições de campo. Houve uma correlação relativamente alta entre os três níveis utilizados na coleta dos dados espectrais de solos no laboratório, campo e satélite.

DONZELI (1979), através de medidas de densidade ótica em aerofotografias coloridas normais e infravermelhas e em amostras da camada superficial de três latossolos, estabeleceu correlações entre as cores dos solos e as cores das suas respectivas imagens fotográficas. Encontrou altos coeficientes de correlação entre as cores das imagens e as cores dos solos determinadas por densitometria. Concluiu que foi possível observar diferenças entre solos, principalmente quando a cor foi importante nessa diferenciação. O Latossolo Vermelho-Amarelo, comparado aos Latossolos Roxo e Vermelho Escuro, apresentou diferenças altamente significativas nas cores das imagens aerofotográficas. Porém, entre os Latossolos Roxo e Vermelho Escuro as diferenças foram mínimas. Observou-

se apenas uma diferença significativa ao nível de 10% de probabilidade, entre esses dois solos, em transparências infravermelhas coloridas, utilizando-se de estatística não-paramétrica.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição geral da área estudada

3.1.1. Situação

A área estudada situa-se na região centro-sudeste do Estado de São Paulo, acompanhando o eixo entre as cidades de Limeira e Araras, dentro da região fisiográfica denominada "Depressão Periférica", tendo como coordenadas $22^{\circ}27'S$ e $47^{\circ}25'W$ Gr., que localizam o centro da área.

Essa área dispõe de uma faixa de cobertura multi-sensorial por aeronave, executada pela NASA em 1969, segundo INPE (1975), cujo material aerofotográfico foi parcialmente utilizado nesta pesquisa. A Fig. 4 mostra a localização da área estudada.

3.1.2. Geologia e Geomorfologia

A província geomorfológica da "Depressão Periférica" compreende uma região fisiográfica de feição característica, assim denominada por Morais Rego, citado por

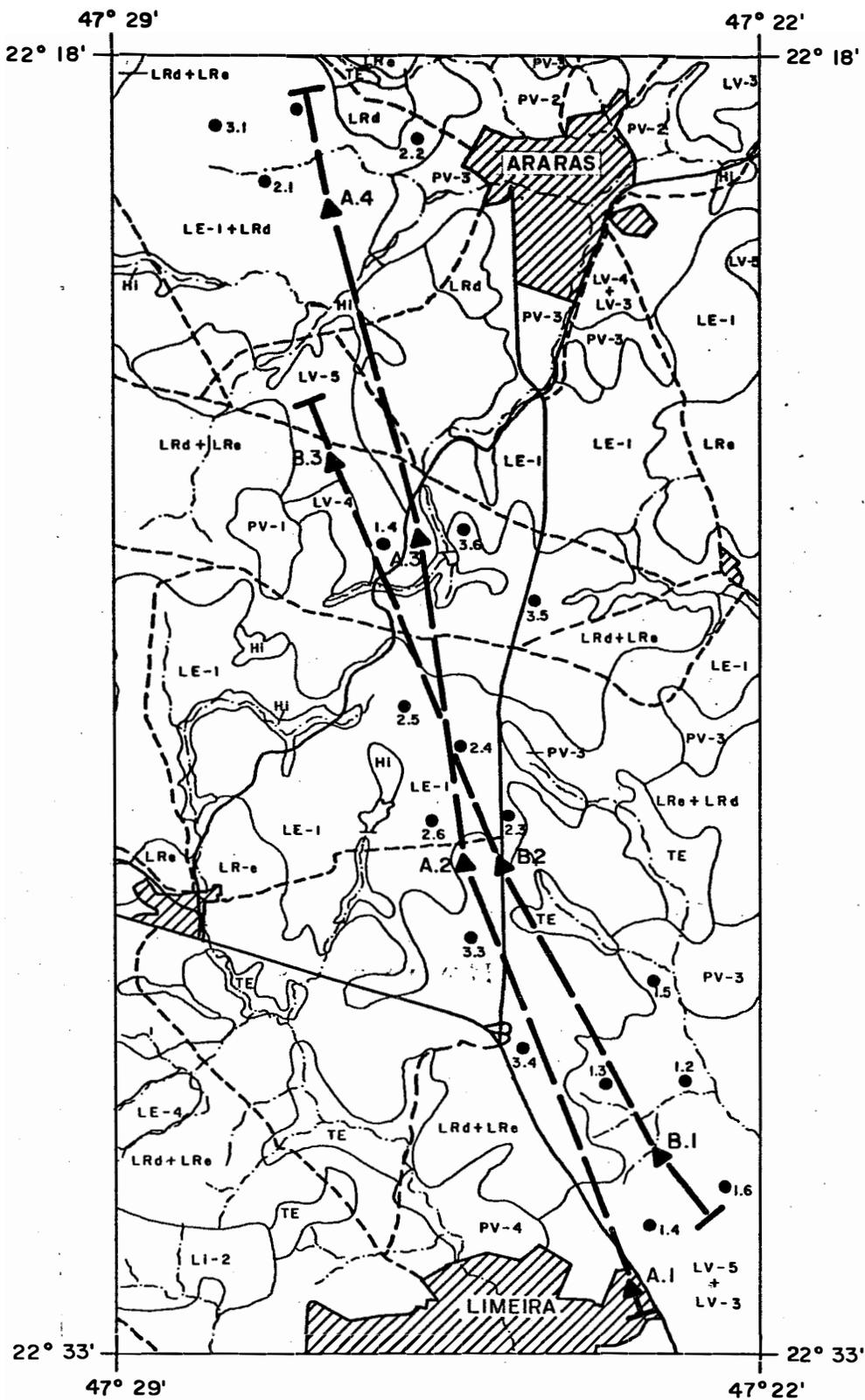


Fig. 5 - Localização da área estudada, unidades pedológicas (LR), pontos amostrados (1.2) e faixa de cobertura multisensorial (linhas A e B). Escala 1:120.000. INPE (1975), OLIVEIRA et alii (1982).

ALMEIDA (1964). Esse autor a descreve como uma área rebaixada pela erosão geológica, situada entre duas outras regiões fisiográficas: "Planalto Atlântico" a Sudeste e "Cuestas Basálticas" a Noroeste do Estado.

Numa subdivisão tríplice dessa região fisiográfica, ocupa em sua quase totalidade a zona denominada por ALMEIDA (1964) de Médio Tietê, e em pequena porção, a zona compreendida pelo divisor de águas da bacia hidrográfica do rio Moji-Guaçu.

O relevo é suave ondulado, constituído por baixas colinas de formas suavizadas e topos aplainados, cuja declividade não ultrapassa os 5%, com vertentes longas de perfil convexo.

A quase totalidade da área é representada por espesso capeamento de material argiloso, bastante intemperizado e proveniente de remanejamento, ocupando as cotas mais altas, conforme OLIVEIRA E ROTTA (1973):

A esses depósitos argilosos correspondem solos muito profundos, porosos e de baixa fertilidade, descritos por OLIVEIRA *et alii* (1982).

Esses sedimentos argilosos capeiam rochas sedimentares relacionadas ao grupo Tubarão (arenitos, siltitos, diamictitos), grupo Passa-Dois, com as formações Irati (dolomitos, folhelhos e siltitos) e Corumbataí (siltitos, folhelhos, arenitos e calcários) e grupo São Bento, com as formações Botucaçu e Piramboia (arenitos, argilitos e conglomerados).

Essas rochas sedimentares e seus produtos de intemperismo formam o substrato da área, assim como, as intrusivas básicas, conforme INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO (1974).

As intrusivas básicas ocorrem infiltradas entre os sedimentos, formando "sills", lacólitos e batólitos, que formam as elevações nesta área, modestas mas que se sobressaem na paisagem.

Pesquisas de PENTEADO (1968), ligadas à geomorfologia da região, indicam a ocorrência generalizada de cascalheiras que marcam as descontinuidades litológicas sob depósitos recentes.

3.1.3. Solos

Dentre as unidades de mapeamento classificadas e descritas por OLIVEIRA *et alii* (1982) na quadrícula de Araras, foram escolhidas aquelas que apresentavam interesse para esta pesquisa e que são os Latossolos Argilosos que predominam nesta área.

Esses solos já foram objeto de estudo anterior, relacionado à densitometria ótica em fotografias aéreas e características das suas cores (DONZELI, 1979). Foram reestudados neste trabalho considerando-se a grande dificuldade de separação desses solos pelos aspectos externos da paisagem, tanto em trabalho de campo como por fotointerpretação preliminar para posterior apoio de campo, além da grande extensão territorial que ocupam em São Paulo.

Três classes de Latossolos foram identificadas por OLIVEIRA *et alii* (1982) na quadrícula de Araras: Latossolos Roxos, Vermelho-Amarelos e Vermelho Escuros. Na área estudada predominam unidades de mapeamento provenientes de subdivisões destas, ou subcategorias, com base no caráter álico, tipo do horizonte A, textura do horizonte B e saturação em bases, sendo selecionadas nesta pesquisa, como categorias mais individualizadas e que receberam nomes regionais, como se segue:

a) Latossolos Roxos- São originários de materiais intemperizados de rochas básicas (basalto e diabásio) apresentando, conseqüentemente, elevados teores de hematita e cores mais vermelhas que 3,5YR e relação valor/croma igual ou inferior a 3,5/5.

Entre os Latossolos Roxos selecionou-se a unidade "Barão Geraldo" (LRd), correspondente ao Latossolo Roxo distrófico.

b) Latossolos Vermelho Escuros (argilosos). Os Latossolos Vermelho Escuros de textura argilosa, ocorrentes nesta área, são provenientes do intemperismo e retrabalhamento de sedimentos finos: argilitos e siltitos com variada contribuição de rochas básicas. As cores com *matiz* mais vermelho que 4YR e *valor* igual ou inferior a 4 (quatro). Os teores de ferro total superiores a 9 e inferiores a 18%.

Entre esses solos selecionou-se a unidade "Limeira" (LE.1), correspondente ao Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa.

c) Latossolos Vermelho-Amarelos (argilosos) - O material de origem destes solos são sedimentos argilosos retrabalhados, relacionados às rochas dos Grupos Tubarão e Passa-Dois. São solos que apresentam cores mais amarelas que 3,5YR e relação *valor/croma* superior a 4/4. Os teores de ferro total são inferiores a 9%, apresentando também o caráter álico ou saturação com alumínio superior a 50%.

Para representar esses solos selecionou-se a Unidade Mato Dentro (LV.5), correspondente ao Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa.

3.1.3.1. Unidade Barão Geraldo (LRd)

A classificação segundo OLIVEIRA *et alii* (1982) é a seguinte:

- Latossolo Roxo epieutrófico ou distrófico, A moderado, textura muito argilosa ou argilosa, relevo suave ondulado.
- Typic Haplorthox e Typic Acrorthox (USA).

Essa unidade apresenta as seguintes características diferenciais de outras unidades:

- 1) Textura muito argilosa ou argilosa;
- 2) Teor de areia grossa inferior a 20%;
- 3) Saturação com bases inferior a 50% e soma de bases inferior a 1,5 e.mg/100g de T.F.S.A.;
- 4) Matiz do horizonte B2 mais vermelho que 3,5YR com relação valor/croma igual ou inferior a 3/5;
- 5) Horizonte B2 sem estrutura ou com estrutura subangular fraca e com consistência muito friável.

As características morfológicas do horizonte A são as seguintes:

- 1) Presença de horizonte superficial Ap devido à grande utilização agrícola desses solos;
- 2) Espessura do A raramente superior a 30cm;
- 3) Cor centrada no matiz 2,5 YR com relação valor/croma 3/4 ou 3/3;
- 4) Textura argilosa e consistência ligeiramente dura; friável, plástica e pegajosa;
- 5) Estrutura mal definida - blocos médios e pequenos sem superfície de fraqueza definida.

As unidades afins à unidade Barão Geraldo são:

- LRe (Ribeirão Preto), que apresenta o caráter eutrófico como característica diferencial. Unidade TE (Terra Roxa Estruturada, que apresenta como principal característica diferencial o caráter eutrófico e a estrutura bem desenvolvida. Também a unidade LE.1 (Limeira) apresenta características afins ao LRd, diferindo desta pelo teor de ferro total: $Fe_2O_3 < 18\%$; e cores mais escuras que 2,5YR 3/4.

3.1.3.2. Unidade Limeira (LE.1)

A classificação, segundo OLIVEIRA *et alii*, (1982), é a seguinte:

- Latossolo Vermelho Escuro distrófico ou álico, A moderado, textura argilosa ou muito argilosa, relevo aplainado ou suave ondulado.

- Typic Haplorthox (USA).

Essa unidade apresenta, além das características diferenciais dos Latossolos Vermelho Escuros, as seguintes características:

- 1) Horizonte A moderado;
- 2) Textura argilosa ou muito argilosa ao longo do perfil;
- 3) Horizonte B1 com estrutura sub angular fraca ou moderada e horizonte B2 sem estrutura ou com estrutura subangular fraca;
- 4) Carater distrófico ou álico.

As características morfológicas do horizonte A são:

- 1) Presença de horizontes Ap ou A₁ e A₃;
- 2) Espessura do A raramente superior a 40cm;
- 3) Cor mais comum do A₁ ou Ap é 3,5YR 3/4;
- 4) Textura argilosa ou muito argilosa e consistência da amostra friável quando úmida e plástica e pegajosa quando molhada;
- 5) Estrutura mal definida ou degradada no Ap, sendo comum a presença de fragmentos pequenos e médios.

3.1.3.3. Unidade Mato Dentro (LV.5)

Segundo OLIVEIRA *et alii* (1982), é classificada como:

- Latossolo Vermelho - Amarelo álico, A moderado, textura argilosa, relevo suave ondulado ou aplainado.
- Typic Haplorthox (USA),

Além das características comuns aos Latossolos Vermelho-Amarelos, apresentam as seguintes características:

- 1) Horizonte A moderado;
- 2) Textura argilosa ou muito argilosa (Hor. B);
- 3) Carater álico ou distrófico;
- 4) Estrutura fraca ou B₂ sem estrutura.

As características morfológicas do horizonte A são:

- 1) Presença de horizontes Ap ou A₁ e A₃;
- 2) Espessura do A raramente superior a 50 cm;
- 3) Cor mais comum é bruno-avermelhado-escura centrada no matiz 5YR ou bruno-escura com matiz 7,5YR;
- 4) Textura mais comum é barrenta, podendo ser argilosa;
- 5) Estrutura mal definida por serem áreas agricultadas, predominando fragmentos duros com 2-3cm de diâmetro.

3.1.4. Características Analíticas das Unidades de Solo

São apresentados na Tabela 3, resultados comparativos de características analíticas para as três unidades descritas, considerando-se apenas o valor médio, o mínimo absoluto e o máximo absoluto de características físico-químicas referentes à camada superficial.

Pode-se verificar por essa tabela, assim como pelas demais características descritas, que a cor e o teor de ferro total podem ser consideradas como importantes características diferenciais para essas unidades de solo.

Tabela 3 - Média (\bar{x}) e valores mínimo e máximo de algumas características da camada superficial dos solos estudados. OLIVEIRA *et alii* (1982).

Características	LRd			LE.1			LV.5		
	\bar{x}	min	max	\bar{x}	min	max	\bar{x}	min	mx
pH	5,1	4,1	6,2	5,1	4,0	6,5	5,0	4,0	5,0
C(1)	1,7	0,7	2,3	1,7	1,4	2,3	1,4	0,4	2,9
S(2)	3,6	0,3	9,7	4,1	0,4	11,2	2,6	0,0	7,7
Al ³⁺ (2)	0,4	0,0	1,5	0,6	0,0	2,0	0,7	0,0	2,4
CTC(3)	14,4	2,9	20,5	10,2	11,6	21,5	19,6	12,2	32,6
V(1)	39,6	6,2	84,3	45,0	7,8	94,9	31,0	0,9	74,4
RC(3)	7,2	1,9	17,3	8,5	3,0	18,4	8,6	3,3	18,4
m(1)	24,0	0,0	68,0	26,0	0,0	71,0	47,0	0,0	96,0
Argila (1)	57,0	29,0	74,0	53,0	36,0	75,0	38,0	24,0	57,0
Limo (1)	0,8	2,0	13,0	8,0	2,0	15,0	5,0	1,0	9,0
Areia fina (1)	24,0	15,0	45,0	25,0	10,0	37,0	40,0	22,0	53,0
Areia Grossa	11,0	3,0	24,0	14,0	2,0	32,0	18,0	6,0	38,0
Fe ₂ O ₃	21,0	17,0	29,0	12,0	5,0	18,0	-	-	-

(C) Carbono, (S) Soma de bases, (Al³⁺) Alumínio Trocável

(CTC) Capacidade de Troca de Cations, (V) Saturação em bases

(RC) Retenção de Cations, (m) Saturação em alumínio

(Fe₂O₃) Ferro Total. (1) %, (2) e.mg/100g de TFSA, (3) e.mg/100g de argila.

3.1.5. Relações solos/geomorfologia

Os solos descritos apresentam grande homogeneidade em características da paisagem, sendo muito difícil estabelecer critérios geomorfológicos a eles relacionados.

Uma pesquisa de critérios de fotointerpretação envolvendo essas três unidades de solo mostrou grande semelhança nas características da drenagem superficial dos mesmos (DONZELI*).

Foram analisadas algumas características das redes de drenagem, com determinação de índices quantitativos para a densidade de drenagem (Dd), Frequência de Calhas (Fc) e Razão de Textura (Rt), características preconizadas por FRANÇA (1968). Como se pode observar na Fig.5 e nas Tabelas 4 e 5, os índices estabelecidos para as unidades LRd (Barão Geraldo), LE.1 (Limeira) e LV.5 (Mato Dentro), apresentam valores próximos, sem diferença estatística significativa.

3.1.6. Clima

Os dados de valores médios de temperatura do ar e da precipitação pluviométrica das localidades de Limeira e Araras no Estado de São Paulo, limítrofes da área estudada, podem ser visualizados na Tabela 6, segundo a estação do ano.

* DONZELI, P.L. - Critérios de fotointerpretação aplicados a solos da quadrícula de Campinas - S.P.

Relatório apresentado ao CNPq. Campinas, Instituto Agrônomo, 60p. (mimeografado).

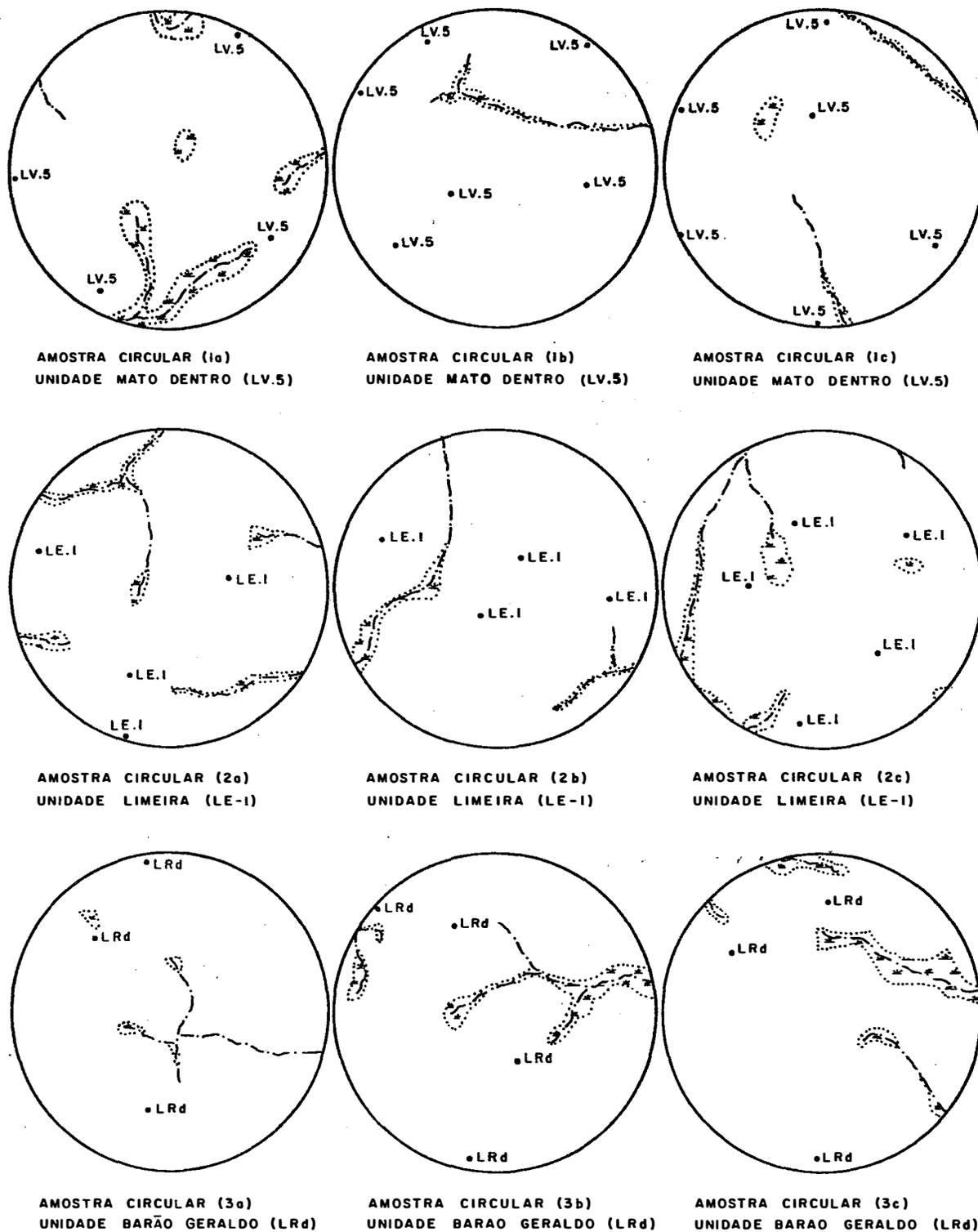


Fig. 6 - Amostras circulares representativas das redes de drenagem dos solos estudados e pontuações referentes à malha de pontos de prospecção do levantamento pedológico. Escala 1:50.000.

Tabela 4 - Características quantitativas do padrão de drenagem das amostras circulares das três unidades de solo estudadas.

Unidades	Amostras	Densidade de Drenagem (Dd)		Frequência Calhas (Fc)		Razão de Textura (Rt)	
		Valor - média	Valor - média	Valor - média	Valor - média	Valor - média	Valor - média
		$s(\hat{m})^*$		$s(\hat{m})$		$s(\hat{m})$	
Mato Dentro (LV.5)	1a	0,60		1,20		0,76	
	1b	0,40		0,60		0,38	
	1c	0,50	0,50	0,60	0,80	0,38	0,51
		$s(\hat{m}) = \pm 0,06$		$s(\hat{m}) = \pm 0,20$		$s(\hat{m}) = \pm 0,48$	
Limeira (LE.1)	2a	0,90		1,20		0,80	
	2b	0,65		0,80		0,51	
	2c	0,75	0,77	0,80	0,93	0,51	0,61
		$s(\hat{m}) = \pm 0,07$		$s(\hat{m}) = \pm 0,13$		$s(\hat{m}) = \pm 0,08$	
Barão Geraldo (LRd)	3a	0,55		0,80		0,51	
	3b	0,75		1,20		0,76	
	3c	0,75	0,68	1,20	1,07	0,76	0,68
		$s(\hat{m}) = \pm 0,06$		$s(\hat{m}) = \pm 0,08$		$s(\hat{m}) = \pm 0,08$	

* $s(\hat{m})$ = erro padrão da média.

Tabela 5 - Valores (D) do teste de Duncan (D.M.S.), para comparação de médias das características quantitativas dos solos estudados.

Características	Valores de Dn* ao nível de 1%	Médias (contrastes) ao nível de 1%	Solos
Densidade de drenagem	D ₃ = 1,14	M ₁ = 0,77	LE.1
	D ₂ = 1,08	M ₂ = 0,68	LRd
		M ₃ = 0,50	LV.5
Frequência Calhas (Fc)	D ₃ = 5,41	M ₁ = 1,07	LRd
	D ₂ = 5,14	M ₂ = 0,93	LE.1
		M ₃ = 0,80	LV.5
Razão de Textura (Rt)	D ₃ = 3,55	M ₁ = 0,68	LRd
	D ₂ = 3,37	M ₂ = 0,61	LE.1
		M ₃ = 0,50	LV.5

*n = Nº de médias a comparar.

** As médias unidas por barra não diferem significativamente ao nível 1% de probabilidade.

Tabela 6 - Médias de temperatura e precipitação pluviométrica, por estação do ano, das localidades de Limeira e Araras - S.P. (1)

Estação do Ano	Meses	Temperatura	Precipitação
		oC	mm
Primavera	Set. Out. Nov. (2)	20,4	330
Verão	Dez. Jan. Fev.	22,0	674
Outono	Mar. Abr. Mai. (3)	19,9	271
Inverno	Jun. Jul. Ago.	17,0	95
Ano	---	19,8	1370

(1) Adaptado de OLIVEIRA *et alii* (1982).

(2) Mês mais quente, temperatura média 22,2°C.

(3) Mês mais frio, temperatura média 16,1°C.

A distribuição das chuvas mostra um regime típico de zonas tropicais de baixa altitude, caracterizado por um verão chuvoso e inverno seco. A temperatura do ar caracteriza as estações do ano, com valores extremos no verão e inverno. Os dados apresentados permitem identificar o clima da área como tipo Cwa do sistema Köppen, subtropical úmido.

Segundo SETZER (1966), as características desse clima são: precipitação pluviométrica média anual superior a 1.000 mm, temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e a do mês mais quente, superior a 22°C.

3.1.7. Vegetação Natural e Uso da Terra

Na área estudada, devido às grandes possibilidades oferecidas pelas características do clima e solos, para utilização agrícola, hoje não mais existe a vegetação natural original, ao que tudo indica constituída por mata subperenifólia. CHIARINI e COELHO (1972), OLIVEIRA *et alii* (1982).

O uso da terra nessa área é representado exclusivamente pela cultura da cana-de-açúcar, desenvolvida em função das mencionadas possibilidades e do grande parque agro-industrial para produção de açúcar e álcool que se instalou na região.

3.2. Equipamentos

3.2.1. Espectrômetro fotoacústico

O equipamento usado para determinação dos espectros óticos em laboratório foi o espectrômetro fotoacústi-

co, montado pela divisão de sistemas sensores do INPE em São José dos Campos, cujo esquema de funcionamento é descrito por ROSENCWAIG (1977). Fig. 3.

O espectro ótico obtido nesse aparelho é dinamicamente compensado para distribuição espectral da energia de uma fonte de luz de xenônio e normalizado em relação ao espectro do preto absoluto. Segundo ROSENCWAIG (1977), esse procedimento parece assegurar a reprodutividade e comparabilidade em relação a espectros de mesmos materiais, obtidos por outras técnicas.

Foram obtidos espectros óticos de absorção na faixa de 450-900 nm, idêntica à faixa de sensibilidade dos filmes infravermelhos coloridos utilizados na pesquisa.

3.2.2. Densitômetros

Para medidas de densidade ótica de imagens homólogas em transparências coloridas normais e infravermelhas foram utilizados os densitômetros de transmissão Mc Beth TD 504 para medidas de densidade difusa, equipado com filtros Status A (vermelho, verde, azul e visual), onde o feixe de luz transmitido é medido segundo uma tolerância angular.

Nas medidas de densidade ótica das cores contidas na carta de cores de solos de Munsell e amostras de solos, utilizou-se o densitômetro de reflexão difusa Mc Beth RD 519, equipado com filtros Status D (vermelho, verde, azul e visual). Esses aparelhos foram calibrados para produ-

zir leituras comparáveis, desde que usados para controle de qualidade de produtos fotográficos, visando a fidelidade de reprodução em relação aos originais.

3.2.3. Estereoscópio

Utilizou-se o estereoscópio de espelho WILD ST-4, equipado com binocular de aumento 3X, com finalidade de seleção de glebas para estudo.

3.3. Material aerofotográfico

Utilizou-se o material da cobertura aerofotográfica da missão experimental de pesquisa nº 96, executada pela NASA em 1969, na região de Campinas, Estado de São Paulo, indicada na Fig.4. Cada área foi sobrevoada em várias linhas, e dentro dessas linhas a aeronave efetuou uma ou mais passagens. As características do material utilizado estão especificadas na Tabela 7, conforme INPE (1975).

Para os trabalhos de campo foram utilizadas aerofotografias pancromáticas da cobertura aerofotogramétrica do Estado de São Paulo, executada pela TERRAFOTO S/A, para o Instituto Brasileiro do Café, em escala aproximada 1:25.000, ano de 1971.

3.4. Seleção das áreas de estudo

3.4.1. Fatores que influenciaram a escolha da área.

Tabela 7 - Características das transparências da missão 96, área 801, Linhad 4, NASA
(Limeira - Araras). Fonte: INPE (1975).

Passagem	Transparências (diapositivos)	Nº	Altura de Vôo	Escala Aprox.	Recobrimento
1	Coloridas	8138/8149	2475 m	1:16.000	60%
1	Falsa-cor	2070/2081	2475 m	1:16.000	60%
2	Coloridas	8379/8394	2475 m	1:16.000	60%
2	Falsa-cor	2309/2325	2475 m	1:16.000	60%
1	Falsa-cor	1895/1920	990 m	1:6.000	60%
2	Falsa-cor	2279/2308	990 m	1:6.000	60%

a) Existência de um mapa de solos em nível de semidetalhe, executado com base numa malha de pontos de prospecção de campo com suficiente densidade, OLIVEIRA *et alii* (1982).

b) Ocorrência predominante nesta área de três latossolos argilosos, cujos padrões fisiográficos são muito semelhantes e os padrões espectrais pouco conhecidos, ocupando significativa área de ocorrência no Estado de São Paulo.

c) Existência de cobertura aerofotográfica multissensorial para desenvolvimento da pesquisa.

d) Área sob cultivo da cana-de-açúcar, que apresenta a característica de homogeneidade de cobertura vegetal e glebas de solos expostos na entressafra, de grande interesse nesta pesquisa.

e) Existência de pesquisa anterior, com apresentação parcial de dados densitométricos, correlacionados neste trabalho a outras características (DONZELI, 1979).

3.4.2. Métodos utilizados na seleção das glebas

As glebas para análise densitométrica foram selecionadas em transparências coloridas infravermelhas em escala 1:6.000, que proporcionaram boa percepção de detalhes do terreno, de grande valia para escolha das glebas com grande homogeneidade de características, tais como, aspectos do preparo do solo, presença de cobertura morta, etc.

O critério utilizado para seleção das glebas levou em consideração os fatores que influenciam nos registros de tonalidade em aerofotografias, com base na revisão de literatura RICCI e PETRI (1965), STEINER e HAEFNER (1965), ESTES e SIMONETT (1975), RAY (1963), LUEDER (1959), PIECH e WALKER (1974).

Alguns cuidados foram tomados com a finalidade de minimizar a influência de variáveis que deveriam ser fixadas na pesquisa, tais como:

- a) Uso de fotos em grandes escalas;
- b) Seleção de glebas dentro da área útil das aerofotos;
- c) Glebas localizadas em apenas duas faixas de voo.

Foram selecionadas para medição 40 glebas de solos expostos em condições homogêneas, das quais foram aproveitadas 18, em função da rede de pontos de prospecção do levantamento pedológico semidetalhado da região.

As 18 glebas selecionadas, com tamanho variável de 1,0 a 3,0 ha, em locais previamente amostrados, são

representadas por duas faixas de cobertura em escala 1:16.000. Dentro das glebas foram coletadas amostras do horizonte superficial (0-20 cm), para análises físicas e químicas.

Para os trabalhos de campo e coleta de amostras nos locais selecionados, foram transferidas as informações das transparências coloridas para cópias em papel preto-e-branco de aerofotografias em escala 1:25.000.

3.5. Análise densitométrica

3.5.1. Dados de densidade ótica - Transmitância ou reflectância relativa

Os dados de densidade ótica em imagens coloridas normais e infravermelhas em escala 1:16.000 foram obtidos com densitômetro Mc Beth TD 504 de transmissão difusa e em amostras de solos e carta de cores de Munsell, com densitômetro Mc Beth RD 519 de reflexão difusa, conforme descrito em DONZELI (1979).

Os dados de densidade ótica foram aproveitados nesta pesquisa, sendo transformados em transmitância ou reflectância com base na equação de SCARPACE e FRIEDERICH (1978).

$$D(\lambda_a) = \log \frac{1}{T(\lambda_a)} \quad \text{sendo} \quad T(\lambda_a) = \frac{1}{\text{anti log } D(\lambda_a)}$$

onde T é a transmitância ou reflectância relativa aos fluxos de luz incidente e transmitido, quando utilizado densitômetro de transmissão ou reflexão.

O valor T é relativo à função de transmitância do filtro usado no densitômetro e \bar{a} sensibilidade relativa do densitômetro ao fluxo de luz; λ a representa uma região espectral, caracterizada pela transmitância do filtro que seleciona o fluxo de luz incidente; e D é a densidade ótica, que é uma função logarítmica.

3.6. Análise de espectroscopia fotoacústica

3.6.1. Preparo das amostras

Para o preparo das amostras das quais foram obtidos os espectros fotoacústicos, foram elas tamizadas em peneira de malha de 1 mm de diâmetro, seguindo a recomendação de MONTGOMERY *et alii* (1976) para a análise espectrométrica, embora tenha sido utilizado outro tipo de aparelho.

Optou-se por essa padronização porque foi a mesma utilizada para a análise densitométrica da cor do solo.

As amostras foram secadas à temperatura ambiente, em igual período de tempo, obtendo-se a TFSA (terra fina seca ao ar).

3.6.2. Espectros de absorção

As amostras foram colocadas em um recipiente, uma por vez, numa célula fechada do aparelho para obtenção dos espectros fotoacústicos que, de acordo com o princípio de funcionamento do aparelho, ROSENCWAIG (1977), correspondem aos verdadeiros espectros de absorção óticos da amostra.

Os espectros foram obtidos na faixa de comprimentos de onda de 400 a 700 nm.

mento de onda de 450-900 nm.

3.6.3. Obtenção de dados

A partir dos espectros de absorção foram determinadas as intensidades relativas de absorvância para cada intervalo de 50 nm, a partir de 450 até 900 nm. Por integração das áreas sob as curvas, que representam as intensidades do sinal fotoacústico em função do comprimento de onda, foram obtidos os valores relativos proporcionais à energia absorvida, uma vez que apenas a luz absorvida é convertida em som.

Os valores de intensidades relativas, proporcionais à *energia absorvida* em cada intervalo de comprimento de onda, foram transformados em porcentagens em função do total de energia absorvida. A partir desses valores foram calculados os valores de intensidades relativas proporcionais a *energia refletida*, desde que:

$$\text{energia absorvida} + \text{refletida} + \text{transmitida} = 1$$

sendo a transmitância nas amostras = 0

3.7. Análise das características físicas e químicas dos solos

3.7.1. Cor do solo

Sendo a cor uma característica influenciada por fatores psico-fisiológicos, procurou-se eliminar a subjetividade da determinação da cor das amostras de solo, quando comparadas visualmente às cartas de cores.

DONZELI (1979) efetuou determinações das cores Munsell-densitométricas das amostras de solos, seguindo metodologia proposta por RIB (1968), com base em ábacos e equações de regressão desenvolvidas por aquele autor.

Esse procedimento introduz erros nas determinações, em função de condições inerentes à pesquisa realizada, onde se incluem a especificação de aparelhos e técnicas metodológicas. No entanto, admite-se que os desvios são proporcionais às medidas reais, relacionando-se com estas através de uma constante, o que se justifica pela obtenção de valores altamente correlacionados às medidas densitométricas e, portanto, independentes de fatores psico-fisiológicos.

No presente trabalho, procurou-se desenvolver equações de regressão específicas para as condições usadas na pesquisa, onde se incluem como principais fatores os densitômetros e transmitância dos filtros, o que minimiza os desvios; restando ainda a influência de fatores relativos às técnicas de preparo das amostras.

Assim sendo, foram aproveitados os valores densitométricos obtidos para as mesmas amostras, segundo a

metodologia descrita por DONZELI (1979).

Essa metodologia descreve aspectos de preparo da amostra para análise densitométrica com densitômetro de reflexão difusa Mc Beth RD 519, com utilização dos filtros Status D (vermelho, verde, azul e visual).

Para estabelecimento das equações de regressão foram efetuadas as leituras densitométricas da carta de cores de Munsell, usada para determinação de cores de solos, incluindo os matizes vermelhos e amarelos (10R, 2,5YR, 5,0YR, 7,5YR, 10YR, 2,5Y e 5,0Y).

Posteriormente, com base em indicações de RIB (1968), foram calculadas as variáveis geradoras das características da cor de Munsell, para as leituras densitométricas da carta de cores, com modificações. As modificações introduzidas referem-se à transformação dos dados de densidade ótica em reflectância relativa, cap. 3-(3.5); e cálculo da variável geradora do matiz, segundo modificação proposta por KOFFLER (1982), considerando-se os valores RR maiores ou menores que a unidade ($RR \geq 1$). A justificativa para substituição de valores de densidade por valores de reflectância relativa é que a densidade é uma função logarítmica da reflectância ou transmitância relativa, sendo que o logaritmo das variáveis de densidade apresentaram altas correlações lineares com as características das cores.

As variáveis consideradas foram as seguintes:

R = variável geradora do valor Munsell/densitométrico .

$$R = V$$

sendo, V = reflectância relativa com filtro visual x 1000

RR = variável geradora do *matiz* Munsell/densitométrico

$$RR = \frac{A}{B}, \text{ sendo } RR \geq 1$$

onde, $A = (T-I)$ e $B = (I-t)$, sendo T , maior valor de reflectância relativa; t , menor valor e I , valor intermediário de reflectância relativa.

RRR = Variável geradora do *coroma* Munsell/densitométrico

$$RRR = \frac{T - t}{t}$$

As equações de regressão calculadas são as seguintes:

$$\text{Matiz} = 20,0 - 10,0 x \dots (1)$$

$$\text{sendo, } x = \log RR = \log \frac{A}{B} = \log \frac{V_m - V_d}{V_d - A_z}$$

onde, V_m = Reflectância relativa com filtro vermelho x 1000

V_d = Reflectância relativa com filtro verde x 1000

A_z = Reflectância relativa com filtro azul x 1000

$$\text{Valor} = 2,40 + 0,01 x \dots (2)$$

sendo, $x = R = V$

$$\text{Croma} = 1,00 + 1,30x \dots (3)$$

$$\text{sendo, } x = RRR = \frac{T - t}{t} = \frac{V_m - A_z}{A_z}$$

Como as variáveis geradoras das características das cores foram calculadas apenas para os matizes vermelhos e amarelos, o filtro vermelho produziu sempre a maior leitura de reflectância relativa e o filtro azul, sempre a menor leitura.

Com base nas equações (1), (2) e (3) foram determinadas as características das cores das amostras de solos.

3.7.2. Óxidos de ferro livres

A determinação dos óxidos de ferro livres, como hematita e goetita, que não estão presos às estruturas cristalinas dos minerais de argila, foi feita pelo método do citrato, bicarbonato e ditonito de sódio (CDB), colorimetricamente pela orto-fenantrolina, segundo JACKSON (1969).

3.7.3. Matéria orgânica

O princípio do método usado na determinação da matéria orgânica do solo foi a sua oxidação por dicromato de sódio em presença de ácido sulfúrico e determinação colorimétrica da cor verde devida ao íon crômico proveniente da reação de oxidação.

Os valores obtidos são de matéria orgânica em % de volume de T.F.S.A., conforme VAN RAIJ e ZULLO (1977).

3.7.4. Análise granulométrica

A composição granulométrica foi obtida pelo método da pipeta, modificado por GROHMANN e VAN RAIJ (1974) com uso do agitador de Wagner, dispersão por hexametáfosfato

de sódio e NaOH. A escala de textura é a de Atterberg e a classificação textural, de MEDINA e GROHMANN (1962).

Areia grossa	2	- 0,2 mm
Areia fina	0,2	- 0,02 mm
Silte	0,02	- 0,002 mm
Argila		< 0,002 mm

3.8. Análise Estatística

Após a obtenção dos dados, de acordo com os métodos descritos, ou seja, dados de reflectância do espectro fotoacústico e reflectância densitométrica relativa em amostras de solos; transmitância relativa em transparências aerofotográficas e dados de análises físicas e químicas, seguiram-se os seguintes procedimentos.

Como primeiro passo foram efetuados cálculos para obtenção de índices relativos às razões espectrais do espectro fotoacústico e sobre dados de fotografias aéreas.

Esse procedimento foi baseado, principalmente, na eliminação da variabilidade dos dados devida amplitude das curvas de reflectância ou transmitância, em proporções constantes a todas regiões do espectro. Assim, foi possível julgar paralelamente a significância desses dados em relação às demais variáveis estudadas.

Em seguida, procedeu-se à análise de variância para verificar a separabilidade espectral entre solos e sua significância.

Foram também efetuadas análises de regressão simples e múltipla, onde os dados espectrais foram considerados como variáveis dependentes e as propriedades físicas e químicas dos solos, como variáveis independentes.

Para a seleção das variáveis da regressão múltipla utilizou-se o processo descrito por DRAPER e SMITH (1966), que requer o exame da significância das variáveis incorporadas ao modelo, em estágios subsequentes, com utilização dos coeficientes de correlação simples e parcial. A seleção começa com uma equação de regressão simples, inserindo gradativamente as demais variáveis. A ordem de inserção das variáveis é determinada usando-se o coeficiente de correlação parcial como uma medida da importância das variáveis que devam compor a equação.

Primeiramente, com base em uma matriz de correlações simples, escolhe-se a variável mais altamente correlacionada com a variável dependente. Em seguida seleciona-se, pelos coeficientes de correlação parcial, outra variável que apresente o mais alto coeficiente com a variável dependente para compor a equação juntamente com a primeira. A cada nova variável na regressão deve-se examinar o coeficiente de correlação múltipla R^2 e valor F, para se verificar a contribuição da variável adicionada na significância da equação.

A análise de regressão foi também utilizada

para determinação das cores Munsell/densitométricas das amostras de solos, exigindo transformação dos dados em $\log x$.

Para análise de variância foi considerado o delineamento inteiramente casualizado, teste F, seguido, quando necessário, do teste de Duncan, para julgar a significância dos confrontos entre médias de tratamentos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Comportamento espectral dos solos estudados

Foram obtidos 9 espectros óticos de absorção, referentes às amostras dos solos estudados (Apêndice 5), em condições de laboratório, com utilização do espectrômetro fotoacústico, descrito em 3.2.1.

Os dados de reflectância espectral com base nos espectros fotoacústicos são apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10.

Utilizando-se a média dos dados de reflectância espectral, para os três tipos de solo estudados, foram construídos histogramas representativos das intensidades relativas de reflectância dessas amostras, bem como representações gráficas desses resultados, com a finalidade de melhor visualização do comportamento espectral desses solos. Figuras 6 e 7.

Pelo exame dos gráficos de intensidade de reflectância do espectro fotoacústico, representados pela

Tabela 8 - Medidas de Reflectância do Espectro Fotoacústico das Amostras da Unidade LV.5

Comp. Onda (450-900nm)	Amostras						Média	
	1.1			1.2			1.3	
	I	%	I	%	I	%	I	%
450-500	115	9,89	126	10,44	106	10,65	116	10,33
500-550	125	10,75	134	11,10	112	11,26	124	11,04
550-600	128	11,01	133	11,02	110	11,05	124	11,03
600-650	131	11,26	135	11,18	109	10,95	125	11,13
650-700	138	11,86	142	11,76	112	11,26	131	11,63
700-750	132	11,35	139	11,52	113	11,36	128	11,41
450-750	769	66,12	809	67,02	662	66,53	748	66,57
750-800	135	11,61	139	11,52	112	11,26	129	11,46
800-850	125	10,75	127	10,52	111	11,16	121	10,80
850-900	134	11,52	132	10,94	110	11,05	125	11,17
750-900	394	33,88	398	32,98	333	33,47	375	33,43
Reflectância Total	1163	100,00	1207	100,0	995	100,00	1123	100,00

Tabela 9 - Medidas de Reflectância do Espectro Fotoacústico das Amostras da Unidade LE.1

Comp. Onda (450-900nm)	Amostras						Média	
	2.1		2.2		2.3			
	I	%	I	%	I	%		
Reflect. Parcial	I	%	I	%	I	%	I	%
450-500	92	9,44	98	9,43	110	9,39	100	9,42
500-550	100	10,26	110	10,59	129	11,02	113	10,62
550-600	105	10,77	115	11,07	135	11,53	118	11,12
600-650	105	10,77	117	11,26	131	11,19	118	11,07
650-700	109	11,18	114	10,97	134	11,44	119	11,20
700-750	115	11,79	117	11,26	135	11,53	122	11,53
450-750	626	64,21	671	64,58	774	66,10	690	64,96
750-800	116	11,90	123	11,84	133	11,36	124	11,70
800-850	110	11,28	117	11,26	126	10,76	118	11,10
850-900	123	12,61	128	12,32	138	11,78	130	12,24
750-900	349	35,79	368	35,42	397	33,90	372	35,04
Reflectância Total	975	100,00	1039	100,00	1171	100,00	1062	100,00

Tabela 10 - Medidas de Reflectância do Espectro Fotoacústico das Amostras da Unidade LRd

Comp. Onda (450-900)nm	Amostras						Média	
	3.1		3.2		3.3		I	%
Reflect. Parcial	I	%	I	%	I	%	I	%
450-500	104	8,90	101	9,65	74	9,15	93	9,23
500-550	122	10,44	104	9,93	78	9,64	101	10,00
550-600	125	10,69	109	10,41	83	10,26	106	10,45
600-650	129	11,04	107	10,22	86	10,63	107	10,63
650-700	132	11,29	113	10,79	95	11,74	113	11,27
700-750	132	11,29	123	11,75	96	11,87	117	11,64
450-750	744	63,65	657	62,75	512	63,29	637	63,23
750-800	136	11,63	127	12,13	96	11,87	120	11,88
800-850	138	11,80	122	11,65	93	11,49	118	11,65
850-900	151	12,92	141	13,47	108	13,35	133	13,25
750-900	425	36,35	390	37,25	297	36,71	371	36,77
Reflectância Total	1169	100,00	1047	100,00	809	100,00	1008	100,00

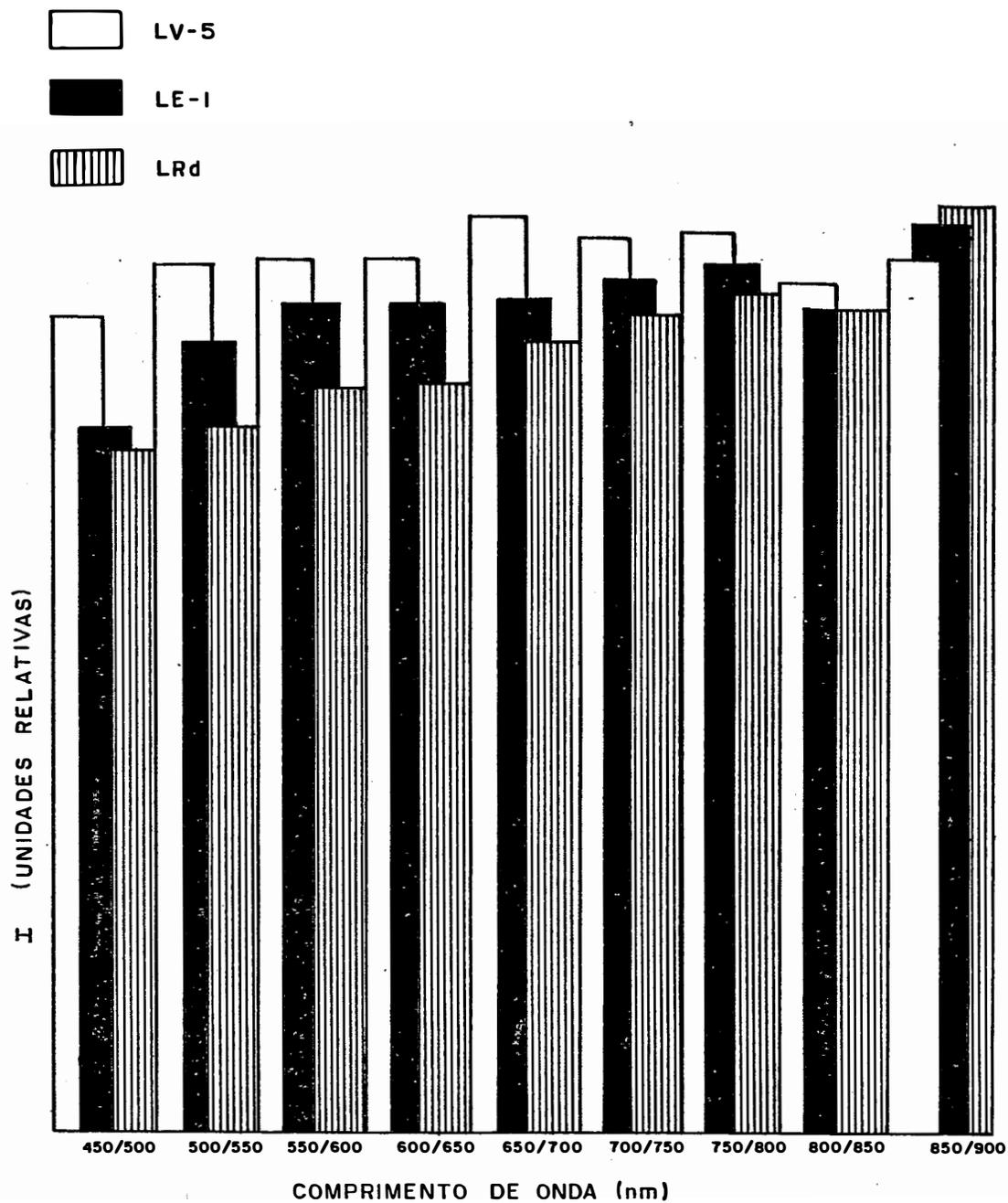


Fig. 7 - Histograma representativo do espectro fotoacústico de reflectância de valores médios, por faixa espectral, para os 3 solos estudados.

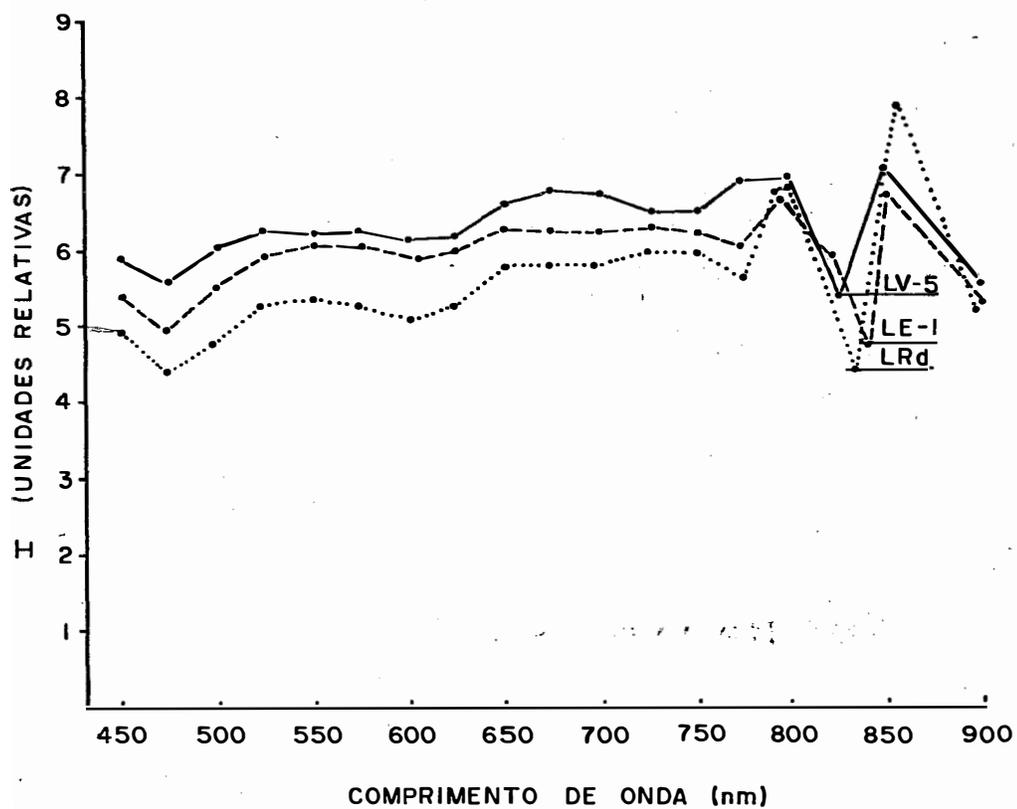


Fig. 8 - Representação gr̃fica do espectro fotoac̃stico de reflect̃ncia de valores m̃dios, para os 3 solos estudados.

Figura 7, pode-se verificar que, nas condições das amostras analisadas, a unidade LRd foi a que apresentou, em média, as menores intensidades de reflectância do espectro visível até 750-780 nanômetros.

As amostras da unidade LE.1 apresentaram um comportamento espectral semelhante às do LRd, na faixa de 450-780 nanômetros, no que se refere às formas das curvas, apresentando no entanto, maior amplitude de reflectância. As amostras da unidade LV.5, além de apresentarem maior amplitude de reflectância que as duas primeiras, apresentaram também algumas diferenças na forma da curva, especialmente nas faixas 650-750 nm e 750-780 nm, como ilustra a Figura 7.

Na faixa do infravermelho reflectivo, acima dos 780 nm, pode-se notar que as amostras dos três solos estudados apresentaram um pico de absorção de energia por volta dos 830 nanômetros e pico de reflectância por volta dos 850 nm, com algumas diferenças quanto à intensidade do sinal fotoacústico. As amostras da unidade LV.5 continuaram a apresentar diferenças no formato da curva em relação aos dois outros solos. As amostras da unidade LRd apresentaram, nessa faixa, as maiores intensidades do sinal fotoacústico nos picos de absorção ou reflectância, mostrando diferenças de comportamento espectral relativamente às amostras das outras duas unidades.

No histograma da Figura 6 pode-se notar a diferença de comportamento espectral dos Latossolos Roxos, unidade LRd, que passaram da menor intensidade de reflectância

no visível, até 750-800 nm, em relação aos outros dois solos para maior intensidade no infravermelho, 850-900 nm. Comparando com os resultados obtidos por outros pesquisadores, pode-se fazer as seguintes considerações: Em solos de textura fina, com altos teores de Fe_2O_3 e relativamente baixos teores de matéria orgânica, semelhantes aos solos estudados neste trabalho (Typic Haplortox), alguns pesquisadores como STONER e BAUMGARDNER (1961), ADRIEN *et alii* (1982) e STONER *et alii* (1980) apontaram curva característica com inflexão após os 750 nm e faixa de absorção de ferro entre 800-900 nm à semelhança do que foi constatado no presente trabalho.

Outra observação refere-se à maior intensidade do sinal fotoacústico dos espectros óticos de absorção obtidos em solos mais escuros e mais ricos em ferro, concordando com MOREIRA-NORDEMANN *et alii* (1983).

Esses espectros diferem apenas quanto à faixa de absorção de ferro, relatada por esses autores na região do laranja-vermelho, enquanto que no presente trabalho essa faixa encontra-se no infravermelho reflectivo.

Observa-se que o pico de absorção por volta de 820 nm é tanto mais pronunciado quanto maiores são os teores de Fe_2O_3 ; e solos com maiores teores de óxidos de ferro apresentaram menor reflectância total, estando esta observação de acordo com o relato de MATHEWS *et alii* (1973).

As amplitudes de reflectância diretamente proporcionais ao tamanho das partículas, em solos argilosos,

foram também observados por STONER *et alii* (1980), à semelhança dos resultados da presente pesquisa.

Este comportamento é possivelmente explicado, segundo considerações de STONER *et alii* (1980), pela capacidade desses solos reterem teores de umidade tanto maiores, quanto mais argilosos forem, sob condições semelhantes, no caso TFSA, e estarem associados com teores crescentes de matéria orgânica, o que é válido na presente pesquisa.

A análise dos dados quantitativos de medidas de reflectância do espectro fotoacústico, Tabelas 8, 9 e 10, comprovam as diferenças médias discutidas para os gráficos e histogramas. No entanto, os dados apresentados em tabelas representam intervalos espectrais de 50 nm, o que mascara as pequenas diferenças de comportamento espectral das amostras. Além disso, verifica-se grande variabilidade dos dados, principalmente quando se consideram as variações de amplitude de reflectância, que são influenciadas por fatores não controlados, como por exemplo o teor de umidade, não podendo os mesmos serem discriminados quando agrupados segundo os tipos de solos. O teor de umidade, no caso, não afeta a forma da curva e sim sua amplitude, como observaram BOWERS e HANKS (1965), MONTGOMERY (1974) e COSTA (1979).

Os dados de relações entre valores de reflectância em várias regiões do espectro são mais recomendáveis para essas comparações, refletindo melhor o comportamento espectral relativo dos solos, procedimento adotado por diversos

autores como PIECH e WALKER (1974), e também FORMAGGIO (1983) e KOFFLER (1982), que utilizaram razões espectrais em suas pesquisas.

Nas Tabelas 11 e 12 pode-se visualizar os dados de relações entre reflectância do espectro fotoacústico das amostras de solos, entre duas regiões: visível (450-750 nm) /infravermelho (750-900 nm).

Nas Tabelas 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são apresentados os dados de transmitância relativa por região espectral em imagens de transparências coloridas normais e infravermelhas, para cada unidade de solo; e na Tabela 19 são apresentados os valores de reflectância densitométrica relativa das amostras de solo. Na Tabela 20 são apresentados os valores das relações entre medidas de transmitância relativa em transparências infravermelhas coloridas.

As cores Munsell/densitométricas obtidas a partir de dados de transmitância relativa em imagens coloridas normais são apresentadas na Tabela 21; e as cores Munsell/densitométricas obtidas a partir de dados de reflectância densitométrica relativa para amostras de solo são apresentadas na Tabela 22.

A análise de variância dos dados das Tabelas 11, 12 e 20 aponta diferenças significativas entre solos pelo teste F, para relação entre valores do espectro fotoacústico, especialmente para os intervalos 450-500/800-900 nm, e também para imagens de aerofotografias infravermelhas. Nessas últimas ocorrem pequenas diferenças dessas relações entre

Tabela 11- Relações entre medidas de reflectância do espectro fotoacústico nas faixas do visível (450-750 nm)/infravermelho (750-900 nm) para amostras de solo.

Unidade de Solo	Amostras			\bar{m}	F	Significância	Teste F	
	1.1	1.2	1.3				Constrastes	Probabilidade
LV.5	1,96	2,03	1,98	1,99	17,65	***	LV.5 ≠ LE.1	95%
LE.1	1,79	1,82	1,95	1,85			LV.5 ≠ LRd	99%
LRd	1,75	1,68	1,72	1,72			LE.1 ≠ LRd	95%

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 12.- Relações entre medidas de reflectância do espectro fotoacústico nas faixas do visível (450-550. nm) / infravermelho (800-900 nm) para amostras de solo.

Unidade de Solo	Amostras			F	Teste F			
	1.1	1.2	1.3		\bar{m}	Significância	Constrastes	Probabilidade
LV.5	0,926	1,004	0,986	0,972	30,5	***	LV.5 \neq LE.1	99%
LE.1	0,824	0,849	0,905	0,859			LV.5 \neq LRd	99%
LRd	0,782	0,779	0,756	0,772			LE.1 \neq LRd	95%

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 13 - Transmittância Relativa por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas Normais Analisadas por Densitometria - Unidade LV.5.

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Transmittância Relativa (Tx1000)						
		Gleblas*						
	Filtros	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	Média
Azul	Azul	132	135	145	195	102	148	143
Verde	Verde	170	182	214	288	148	200	200
Vermelho	Vermelho	309	363	389	468	288	380	366
Total		611	680	748	951	538	728	709
	Visual	224	219	245	316	178	234	236

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 14 - Transmissão por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas
 Normais Analisadas por Densitometria - Unidade LE.1

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Filtros	Transmitância Relativa (Tx1000)						
			2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	Média
Azul	Azul	Azul	35	35	32	32	25	32	32
Verde	Verde	Verde	76	68	62	65	45	59	62
Vermelho	Vermelho	Vermelho	288	282	240	257	174	229	245
Total			399	385	334	354	244	320	339
	Visual	Visual	123	117	100	107	66	100	102

*Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 15 - Transmittância Relativa por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas Normais Analisadas por Densitometria - Unidade LRd.

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Transmittância Relativa (Tx1000)						
		Glebas*						
	Filtros	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	Média
Azul	Azul	35	32	30	89	27	33	41
Verde	Verde	68	52	50	120	42	63	66
Vermelho	Vermelho	269	234	151	275	190	240	226
Total		372	318	231	484	259	336	333
	Visual	117	93	54	135	81	102	97

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 16 - Transmittância Relativa por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas Infravermelhas Analisadas por Densitometria - Unidade LV.5.

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Filtros	Transmittância Relativa (Tx1000)						
			1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	Média
Verde	Azul	Azul	135	148	204	186	95	87	142
Vermelho	Verde	Verde	151	155	195	219	100	91	152
Infra-Vermelho	Vermelho	Vermelho	245	263	338	355	229	138	261
Total			531	566	737	760	424	316	555

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 17 - Transmittância Relativa por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas Infravermelhas Analisadas por Densitometria - Unidade L.E.1.

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Transmittância Relativa (Tx1000)						
		Glebas*						
	Filtros	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	Média
Verde	Azul	20	21	17	19	14	19	18
Vermelho	Verde	38	39	32	42	22	36	35
Infra-Vermelho	Vermelho	35	34	29	35	16	30	30
Total		93	94	78	96	52	85	83

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 18 - Transmittância Relativa por Região Espectral em Imagens de Transparências Coloridas Infravermelhas Analisadas por Densitometria - Unidade LRd

Sensibilidade Espectral	Cor Relativa	Transmittância Relativa (Tx1000)								
		Filtros	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	Média	
Verde	Azul	Azul	17	19	15	14	14	16	16	16
Vermelho	Verde	Verde	29	31	19	16	20	25	23	23
Infra-Vermelho	Vermelho	Vermelho	27	28	16	13	19	23	21	21
Total			73	78	50	43	53	64	60	60

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 19 - Reflectância Densitométrica relativa (I x 1000) das amostras de solo (TFSA).

Filtros	Unidade LV.5						Unidade LE.1						Unidade LRd					
	Amostras						Amostras						Amostras					
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Vermelho	87	93	117	89	115	100	91	93	78	78	72	76	69	81	63	69	83	72
Verde	37	39	59	42	47	47	30	32	26	27	22	24	24	27	22	24	27	27
Azul	20	20	34	23	26	27	17	18	14	14	12	14	14	14	12	13	14	15
Visual	66	71	93	69	85	76	63	64	54	55	49	51	48	56	44	49	57	51

Tabela 20 - Relações entre medidas de transmitância relativa em imagens de transparências coloridas infravermelhas das faixas (verde + vermelho)/infravermelho.

Unidade de Solo	Glebas					Teste F					
	1	2	3	4	5	\bar{m}	F	Significância	Contrastes	Probabilidade	
LV.5	1,16	1,15	1,18	1,14	0,85	1,28	1,13	25,69	***	LV.5 ≠ LE.1	99%
LE.1	1,65	1,76	1,68	1,74	2,25	1,83	1,82			LV.5 ≠ LRd	99%
LRd	1,70	1,78	2,12	2,30	1,79	1,78	1,91			LE.1 = LRd	< 95%

*** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

Tabela 21 - Notação Munsell/densitométrica das imagens de transparências coloridas normais.

Solo	Gleba*	Cor	
		Matiz	Valor/Croma
LV.5	1.1	4,4 YR	4,6/2,7
	1.2	4,1 YR	4,6/3,2
	1.3	5,9 YR	4,8/3,2
	1.4	7,1 YR	5,6/2,8
	1.5	5,2 YR	4,2/3,4
	1.6	4,6 YR	4,7/3,0
LE.1	2.1	2,9 YR	3,6/8,0
	2.2	1,9 YR	3,6/8,0
	2.3	2,3 YR	3,4/8,0
	2.4	2,3 YR	3,5/8,0
	2.5	1,9 YR	3,1/8,0
	2.6	2,0 YR	3,4/8,0
LRd	3.1	3,1 YR	3,6/8,0
	3.2	0,4 YR	3,3/8,0
	3.3	2,9 YR	2,9/6,2
	3.4	3,0 YR	3,8/3,7
	3.5	0,1 YR	3,2/8,0
	3.6	2,3 YR	3,4/8,0

* Correspondentes aos locais de amostragem.

Tabela 22 - Notação Munsell/densitométrica das amostras de solos (TFSA).

Solo	Amostra	Cor	
		Matiz	Valor/Croma
LV.5	1.1	5,3 YR	3,1/5,3
	1.2	5,4 YR	3,1/5,7
	1.3	6,3 YR	3,3/4,2
	1.4	6,1 YR	3,1/4,7
	1.5	4,9 YR	3,2/5,4
	1.6	5,7 YR	3,2/4,5
LE.1	2.1	3,3 YR	3,0/6,6
	2.2	3,6 YR	3,0/6,4
	2.3	3,6 YR	2,9/6,9
	2.4	4,1 YR	2,9/6,9
	2.5	3,0 YR	2,9/7,5
	2.6	2,8 YR	2,9/6,7
LRd	3.1	3,4 YR	2,9/6,1
	3.2	3,8 YR	2,9/7,2
	3.3	3,8 YR	2,8/6,5
	3.4	3,8 YR	2,9/6,6
	3.5	3,6 YR	2,9/7,4
	3.6	4,2 YR	2,9/5,9

os solos LE.1 e LRd, cujos contrastes analisados pelo teste de Duncan, complementar do Teste F, não apresentaram diferenças significativas até o nível de 5% de probabilidade.

4.2. Relações entre cores dos solos e suas respectivas imagens aerofotográficas

A comparação das cores Munsell/densitométricas obtidas para amostras de solos e em imagens de transparências coloridas normais, revela altos coeficientes de correlação simples, significativos ao nível de 1% de probabilidade para o *matiz*, *valor* e *chroma* Munsell/densitométricos, como se pode observar na Tabela 23.

Esses resultados confirmam aqueles encontrados em pesquisa anterior (DONZELI, 1979), segundo metodologia proposta por RIB (1968) para determinação das cores Munsell/densitométricas, concordando também com DOMINGUES (1960), que encontrou altas correlações entre as cores dos solos e cores registradas em fotos aéreas. No entanto, pelo confronto das Tabelas 21 e 22 pode-se notar que não houve grande precisão na fidelidade de reprodução das cores dos solos pelas fotografias aéreas coloridas. Em geral, as imagens de transparências aerofotográficas coloridas apresentaram matizes ligeiramente mais vermelhos em todas as amostras, representados por valores em média 1,14 YR mais baixos do que as amostras de solos. Pode-se também notar valores mais baixos para a relação valor/croma dos solos mais claros, como os pertencentes à

Tabela 23 - Coeficiente de correlação simples entre cores Munsell/densitométricas das amostras de solos e respectivas imagens fotográficas.

Cor	R	R ²
Matiz	0,82**	0,67
Valor	0,83**	0,69
Croma	0,80**	0,64
Valor/Croma	0,85**	0,72

** Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

unidade LV.5, enquanto que para a relação valor/croma dos solos mais escuros, houve boa correspondência, embora essa relação tenha sido obtida com "valor e croma" mais baixos nas amostras de solos. PARRY *et alii* (1969) relatam resultados semelhantes, não encontrando sempre a exata correspondência entre as cores dos solos e cores em cópias fotográficas.

A diferença entre as cores Munsell/densitométricas das amostras de solos e respectivas imagens fotográficas, tanto pode ser devida aos fatores inerentes aos filmes fotográficos (exposição, processamento) ou que interferem na obtenção das imagens, como os citados por LUEDER (1959), RAY (1963), RICCI e PETRI (1965), STEINER e HAEFNER (1965), ESTES e SIMONETT (1975), como também ao processo de obtenção de dados densitométricos. Neste caso, pode-se citar especialmente, o uso de lâminulas de vidro sobre as amostras, ... metodologia desaconselhada por MONTGOMERY *et alii* (1976) e outros pesquisadores citados por estes, que de maneira semelhante, encontraram pequenas diferenças constantes, entre leituras espectrométricas obtidas diretamente, ou através de placas de vidro colocadas sobre as amostras.

Para os resultados apresentados, as cores Munsell/densitométricas das amostras de solos foram mais semelhantes às cores centrais das unidades de solo descritas por OLIVEIRA *et alii* (1982), que na pesquisa anterior de DONZELI (1979).

4.3. Relações entre dados de reflectância do espectro fotoacústico dos solos, características físicas e químicas e registros de tonalidade em aerofotografias

No Apêndice 1 podem ser observados os dados de análises físicas e químicas das amostras dos solos estudadas, com exceção da cor Munsell/densitométrica que se encontra na Tabela 22.

As relações quantitativas entre a intensidade e composição espectral da radiação refletida pelas amostras de solos e suas características físico-químicas, expressa pelos parâmetros constantes do Apêndice 1 e Tabela 22, foram avaliadas através de equações de regressão entre as suas variáveis representativas.

A reflectância espectral em intervalos de 50nm, de 450 até 900nm, contida nas Tabelas 8, 9 e 10, foi correlacionada a seis variáveis independentes, número máximo limitado pelo número de amostras analisadas, estando os coeficientes de correlação linear simples e parcial apresentados na Tabela 24.

Como se pode observar, a significância dos coeficientes apresentados nessa tabela é relativamente baixa, desde que são significativos ao nível de 5% de probabilidade os coeficientes superiores a 0,66.

Enquanto os coeficientes de correlação simples expressam as relações entre apenas duas variáveis numa matriz

Tabela 24 - Coeficientes de correlação simples e parcial entre a reflectância espectral e demais variáveis, usados na seleção da equação de regressão múltipla com duas variáveis.

Comp. Onda n.m	Correlação Simples e Parcial												
	Fe ₂ O ₃		Mat. Orgânica		Argila		Matiz		F. Color (verm./verde)		F. IV. (verm./verde)		
	R	R Parcial	R	R Parcial	R	R Parcial	R	R Parcial	R	R Parcial	R	R Parcial	
450-500	-0,53	-0,21	0,06	0,25	-0,52	-0,15	0,06	0,34	-0,41	0,81	0,67	0,16	0,85
500-550	-0,40	-0,58	-0,03	0,65	-0,47	-0,73	0,34	-0,75	-0,26	0,49	0,50	-0,43	0,86
550-600	-0,29	-0,52	0,10	0,64	-0,34	-0,65	0,20	-0,69	-0,14	0,44	0,37	-0,36	0,80
600-650	-0,30	-0,40	0,05	0,46	-0,36	-0,61	0,21	-0,73	-0,19	0,34	0,40	-0,25	0,78
650-700	-0,30	-0,22	0,05	0,59	-0,42	-0,61	0,27	-0,75	-0,28	0,15	0,46	-0,16	0,84
700-750	-0,17	-0,25	0,21	0,73	-0,29	-0,66	0,13	-0,78	-0,07	0,63	0,33	-0,08	0,90
750-800	-0,09	0,04	0,21	0,45	-0,22	-0,44	0,06	-0,71	0,01	0,69	0,26	0,22	0,86
800-850	0,03	-0,08	0,23	0,28	-0,14	-0,55	-0,01	-0,74	0,12	0,70	0,16	0,05	0,84
850-900	0,40	0,52	0,54	0,29	0,22	-0,28	-0,36	-0,67	0,44	0,75	-0,20	0,40	0,88
450-750	-0,34	-0,43	0,03	0,63	-0,43	-0,66	0,28	-0,74	-0,23	0,47	0,46	-0,26	0,85
750-900	0,11	0,24	0,34	0,36	-0,44	-0,45	-0,11	-0,72	0,20	0,73	0,07	0,24	0,86

de correlações, os coeficientes de correlação parcial dão idéia da influência das outras variáveis no modelo.

A baixa significância da relação entre a reflectância do espectro fotoacústico e as variáveis estudadas são discutidas a seguir.

O pequeno número de amostras analisadas (nove amostras) limita, "a priori", a possibilidade de significância de baixos coeficientes de correlação.

A variabilidade dos valores de reflectância, devida apenas à amplitude das curvas que, por sua vez, pode ser resultante do efeito de variáveis não consideradas nessa pesquisa, é possivelmente a principal causa. Essa afirmativa pode ser comprovada pelo significativo aumento nos coeficientes de correlação simples com o uso de razões de reflectância entre faixas largas ou estreitas de regiões do visível e infravermelho, apresentadas na Tabela 25.

Os intervalos de 50nm, computados por integração das áreas sob as curvas de reflectância, podem ser demasiadamente largos, minimizando os efeitos diferenciais em estreitas faixas ou picos de absorção ou reflectância, afetando assim os resultados.

As duas variáveis que entraram nas regressões múltiplas apresentadas na Tabela 26 foram escolhidas com base nos coeficientes da Tabela 24 conforme a proposição de DRAPER e SMITH (1966) relatada em 3.8.

A primeira variável das regressões, representada pela porcentagem de argila, foi a que apresentou o mais alto coeficiente de correlação simples, em todas as faixas de comprimento de onda. O matiz da cor apresentou o mais alto coeficiente de correlação parcial, também em todas as faixas do espectro, constituindo a segunda variável a integrar as equações de regressão múltipla. Apenas duas variáveis integram as equações pelo pequeno número de amostras analisadas, devido ao valor limite do teste F para significância em função dos graus de liberdade residuais.

Os dados das Tabelas 24 e 25, sendo analisados comparativamente, entre faixas do espectro, sem levar em consideração sua significância, são comentados a seguir.

Examinando-se os coeficientes de correlação simples entre a reflectância espectral e teores de óxidos de ferro livres, pode-se notar que existe uma relação inversa, na faixa do visível, o que confere com observações feitas por vários autores, como Obúkhov e Orlov, citados por MONTGOMERY *et alii* (1976), MATHEWS *et alii* (1973). Coeficientes mais altos são notados nas faixas extremas do espectro estudado. Na faixa 450-500 nm notam-se os coeficientes mais elevados, que decrescem até 850 nm, quando voltam a elevar-se bruscamente, apresentando nessa faixa do infravermelho, coeficientes positivos. A razão entre valores de reflectância para as regiões do visível e do infravermelho, Tabela 25, mostrou alta correlação significativa com os óxidos de ferro, provando estar a faixa do infravermelho respondendo diferencialmente à do vi-

Tabela 25 - Coeficiente de correlação linear simples entre razões de reflectância espectral e demais variáveis independentes.

Razão de Reflect. (nm)	Características físico-químicas dos solos			
	Fe ₂ O ₃	Mat.Orgânica	Argila	Matiz
450-750 750-900	-0,84**	-0,48	-0,78*	0,73*
450-550 800-900	-0,43	-0,57	-0,85**	0,82**

* Significativo a 5% de probabilidade;

** Significativo a 1% de probabilidade.

Tabela 26 - Coeficientes de correlação entre valores de refletância do espectro fotoacústico e par de variáveis selecionadas. Análise de regressão múltipla.

Faixa espectro (nm)	Equação de Regressão	R	R ²	F*
450-500	$y = 220,35 - 1,17x_3 - 3,22x_4$	0,94	0,88	23,18
500-550	$y = 1104,52 - 4,31x_3 - 51,70x_4$	0,80	0,64	5,31
550-600	$y = 1076,57 - 4,05x_3 - 50,58x_4$	0,75	0,55	3,74
600-650	$y = 1157,91 - 4,38x_3 - 54,87x_4$	0,81	0,66	5,73
650-700	$y = 1171,28 - 4,46x_3 - 55,16x_4$	0,86	0,74	8,36
700-750	$y = 1027,57 - 3,74x_3 - 47,94x_4$	0,81	0,65	5,62
750-800	$y = 1064,10 - 3,84x_3 - 50,0x_4$	0,79	0,62	5,00
800-850	$y = 972,20 - 3,43x_3 - 45,61x_4$	0,65	0,42	2,21
850-900	$y = 996,70 - 3,23x_3 - 47,43x_4$	0,77	0,59	4,30
450-750	$y = 6369,10 - 24,28x_3 - 297,50x_4$	0,81	0,66	5,96
750-900	$y = 3033,0 - 10,49x_3 - 143,05x_4$	0,78	0,61	4,80

x_3 = argila

x_4 = matiz

* = valores de F superiores a 5,13 significantes a 5% de probabilidade.

sível para teores crescentes de óxidos de ferro, concordando com relatos de MONTGOMERY *et alii* (1976), STONER *et alii* (1980).

A matéria orgânica, de maneira geral, apresentou baixos coeficientes de correlação na faixa examinada (450-900 nm), com exceção da faixa 850-900 nm do infravermelho onde o coeficiente foi mais alto. Entretanto, pesquisas de outros autores como BAUMGARDNER *et alii* (1970) revelaram altos coeficientes de correlação linear entre reflectância espectral e matéria orgânica, embora esses autores tivessem trabalhado com solos que apresentavam elevados teores de matéria orgânica.

As relações inversas entre razões espectrais e matéria orgânica, Tabela 25 conferem com citações de BOWERS e HANKS (1965), PAGE (1974), STONER e BAUMGARDNER (1981), AL-ABBAS *at alii* (1972), sendo que os coeficientes continuaram não significativos, embora mais elevados. O motivo para tal pode ser fundamentado na explicação de STONER e BAUMGARDNER (1981), que em solos com altos teores de Fe_2O_3 , maiores que 4% em solos minerais, há um mascaramento dos efeitos da matéria orgânica na reflectância espectral.

Quanto ao teor de argila, os melhores coeficientes de correlação foram notados nas porções do espectro visível, diminuindo no infravermelho. As faixas que apresentaram as melhores correlações foram 450-500 e 650-700 nm.

O *matiz* correlacionou-se melhor com a reflectância do espectro fotoacústico em sua porção mediana

(550-700 nm - faixa do vermelho) e (850-900 nm - infravermelho), embora a faixa do visível como um todo tenha apresentado os mais altos coeficientes de correlação. Essas observações concordam com as de MYERS e ALLEN (1968), MONTGOMERY *et alii* (1976) e VALÉRIO FILHO *et alii* (1976), KRISTOFF *et alii* (1980), que citaram essas regiões do espectro como mais correlacionadas à cor do solo como um todo.

Nas correlações entre as razões espectrais nas faixas do visível e do infravermelho, a porcentagem de argila assim como o *matiz*, exibiram isoladamente coeficientes de correlação significativos com a reflectância espectral, sendo também as duas variáveis selecionadas em conjunto nas equações de regressão, que se mostraram mais significativamente correlacionadas, em todo o espectro, à reflectância espectral, Tabela 26. As faixas 450-500 e 650-700 nm, novamente apresentaram os maiores coeficientes de correlação, $R = 0,94$ e $0,86$ respectivamente para as equações de regressão múltiplas.

As medidas de transmitância relativa das imagens de fotografias coloridas infravermelhas mostraram-se mais altamente correlacionadas com os espectros fotoacústicos, que as das coloridas normais, sendo que ambas mostraram maiores correlações nas porções iniciais do espectro, ou seja, na faixa do visível.

4.4. Relações entre dados de reflectância densitométrica relativa dos solos, características físicas e químicas e registros de tonalidade em aerofotografias

As Tabelas 27 e 28 sintetizam essas relações através de uma matriz de coeficientes de correlação simples e parcial.

A reflectância densitométrica relativa das amostras de solo (Tabela 19), avaliada através dos filtros azul, verde e vermelho, representam esses dados em três regiões do espectro visível.

A cor do solo, através de seus componentes *matiz*, *valor* e *chroma*, sendo função dos dados densitométricos, se equivalem a estas medidas, guardando com elas altas correlações.

Os dados de reflectância densitométrica, tendo sido obtidos com número maior de amostras, têm limites de significância menores e tornam possível relacionar um maior número de variáveis, como se observa nas Tabelas 27 e 28.

Aplicando-se a estes dados o mesmo raciocínio desenvolvido para as relações com a reflectância do espectro fotoacústico, verifica-se que os componentes da cor, *valor* e *matiz* - seriam as variáveis escolhidas para integrarem equações de regressão múltipla por exibirem, respectivamente, os maiores coeficientes de correlações simples e parcial, nos três filtros. Desprezando-se essas variáveis por serem origi-

Tabela 27 - Matriz dos coeficientes de correlação simples entre as variáveis estudadas.

Fe ₂ O ₃	M.Org	A.Gros	A.Fina	Silte	Argila	Cor		F.Col	F. IV	Reflect. Solo					
						Matiz	Valor			Croma	vm/vd	vm/vd	Azul	Verde	Verm.
Fe ₂ O ₃	1,0	0,71	-0,68	-0,76	0,73	0,79	-0,81	-0,90	0,79	0,79	-0,82	-0,85	-0,87	-0,79	
M.Org.		1,0	-0,71	-0,64	0,39	0,79	-0,62	-0,63	0,69	0,58	-0,56	-0,67	-0,65	-0,50	
A.Gros:			1,0	0,46	-0,54	-0,83	0,71	0,62	-0,72	-0,51	0,43	0,68	0,66	0,44	
A.Fina				1,0	-0,68	-0,83	0,75	0,66	-0,67	-0,62	0,69	0,61	0,65	0,54	
Silte					1,0	0,57	-0,70	-0,75	0,65	0,44	-0,64	-0,73	-0,76	-0,73	
Argila						1,0	-0,82	-0,67	0,77	0,68	-0,62	-0,67	-0,69	-0,46	
Matiz							1,0	0,83	-0,89	-0,84	0,82	0,85	0,88	0,67	
o Valor								1,0	-0,85	-0,75	0,88	0,97	0,98	0,93	
r Croma									1,0	0,83	-0,78	-0,89	-0,87	-0,66	
F.Col. vm/vd										1,0	-0,80	-0,72	-0,74	-0,52	
F. IV vm/vd											1,0	0,83	0,87	0,81	
Ref. do Solo												1,0	0,99	0,91	
Azul													1,0	0,92	
Verde														1,0	
Verm.															1,0

0,468* -valores significantes a 5% de probabilidade;

0,590** -valores significantes a 1% de probabilidade.

Tabela 28 - Matriz dos coeficientes de correlação parcial entre as variáveis estudadas.

	Fe ₂ O ₃	Mat. Org.	Mat. Grossa	Areia Fina	Areia Grossa	Silte	Argila	Cor			F.Col. F.IV			Reflect. Solo			
								Matiz	Valor	Croma	vm/vd	ym/vd	Azul	Verde	Verm.	Matiz	Valor
Fe ₂ O ₃	-1,0	-0,03	-0,35	-0,22	0,21	-0,02	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,83	0,03	0,03	-0,05	0,12	-0,49
Mat.Org.		-1,0	-0,72	-0,70	-0,68	-0,61	0,58	0,57	0,12	0,29	-0,29	0,29	-0,29	0,31	-0,43	0,43	
Ar.Grossa			-1,0	-0,92	-0,66	-0,89	0,55	0,48	0,00	0,54	-0,41	0,54	-0,41	0,28	-0,38	0,33	
Ar.Fina				-1,0	-0,72	-0,94	0,34	0,42	-0,26	0,39	-0,58	0,39	-0,58	-0,02	-0,16	0,38	
Silte					-1,0	-0,74	0,39	0,32	0,09	-0,05	-0,32	0,32	-0,32	0,24	-0,34	0,46	
Argila						-1,0	0,37	0,34	-0,18	0,20	-0,57	0,20	-0,57	0,11	-0,25	0,53	
Matiz							-1,0	-0,45	-0,71	-0,26	-0,20	-0,26	-0,20	-0,91	0,96	-0,60	
Valor								-1,0	-0,20	-0,42	0,10	-0,42	0,10	-0,26	0,34	-0,08	
Croma									-1,0	0,04	-0,65	-0,65	-0,65	-0,90	0,81	-0,19	
F.Col.vd										-1,0	-0,06	-0,06	-0,06	-0,09	0,06	0,36	
F.IV vm/vd											-1,0	-0,48	-0,48	0,34	0,26		
Ref. Azul												-1,0	0,97	-0,46			
do Verde													-1,0	0,62			
Solo Verm.														-1,0			

nadas das medidas densitométricas, os óxidos de ferro livres e o teor de argila ou de matéria orgânica são as variáveis seguintes a integrarem as equações de regressão múltipla. Assim, segundo as Tabelas 27 e 28, tem-se:

Filtro vermelho

Fe₂O₃: R simples = -0,79

Argila: R parcial = 0,53

Filtro verde

Fe₂O₃: R simples = -0,87

Matéria orgânica: R parcial = -0,43

Filtro azul

Fe₂O₃: R simples = -0,85

Matéria orgânica: R parcial = 0,31

Estando a porcentagem de argila, assim como os teores de óxidos de ferro, bastante correlacionados com a cor, na região do vermelho essas duas variáveis se sobressaem. Nas outras regiões do espectro visível, especialmente o verde, sobressai-se a matéria orgânica, como foi também observado por STONER e BAUMGARDNER (1979) e ADRIEN *et alii* (1982).

Entre as características físicas e químicas dos solos, excluindo-se a cor, são os óxidos de ferro que apresentam as maiores correlações lineares simples com a reflectância densitométrica.

Quanto às classes de areia, os coeficientes foram equivalentes, sendo que as medidas dos filtros *azul* e *verde* apresentaram maiores coeficientes significativos para areia fina e areia grossa.

Entre as medidas densitométricas em imagens aerofotográficas, novamente as transparências infravermelhas coloridas apresentaram altos coeficientes de correlação com a reflectância densitométrica, superiores aos obtidos em imagens coloridas normais.

4.5. Relações entre as características dos solos estudados

Através da matriz de correlações simples da Tabela 27, que relaciona maior número de variáveis, pode-se verificar que parâmetros de solos, tais como óxidos de ferro livres, cor, granulometria e matéria orgânica, exibem coeficientes de correlação significativos com a reflectância densitométrica e registros tonais nas imagens, fato já observado também por numerosos autores como COSTA (1979), HOFFER e JOHANNSEN (1969), MYERS (1979), MATHEWS *et alii* (1973), PETERSON *et alii* (1979), PLANET (1970), STONER e BAUMGARDNER (1981), PAGE (1974), embora trabalhando com equipamentos e materiais diferentes.

As características estudadas, como matéria orgânica, argila e óxidos de ferro, apresentaram altas correlações com os componentes da cor, significativas ao nível de 1%

de probabilidade, como foi também observado por COSTA (1979) e por McKEAGUE *et alii* (1971).

O teor de óxidos de ferro foi a característica mais correlacionada à cor do solo e o *matiz* foi o componente da cor que apresentou os maiores coeficientes de correlação com as outras características do solo.

Os valores de transmitância nas imagens aerofotográficas apresentaram, no geral, altos coeficientes de correlação com as características estudadas, mostrando-se bastante eficientes na discriminação das características dos solos. Em relação às características do solo, pode-se dizer que houve uma equivalência dos dois tipos de imagens na discriminação do *matiz* e *chroma* e uma ligeira vantagem à favor das transparências infravermelhas na discriminação do *valor*.

Quanto às demais características, as medidas nos dois tipos de transparências apresentaram coeficientes de significância equivalentes, apenas se destacando o coeficiente entre silte e transmitância nas imagens infravermelhas.

Esses resultados permitem, até certo ponto, comparação generalizada com trabalhos de outros autores que também encontraram correlação significativa das características de imagens de diversos tipos na discriminação de solos; como MATHEWS *et alii* (1973), CARNEIRO e AZOLIM (1976), MYERS (1979), CIHLAR e PROTZ (1972), MAY e PETERSEN (1975), KRISTOF e ZACHARY (1971).

As conclusões de COSTA (1979), embora também constatadas por DONZELI (1979), de que as leituras de cor em laboratório mostraram-se eficientes na discriminação desse parâmetro, pela padronização dos procedimentos, foram novamente comprovadas nesta pesquisa.

5. CONCLUSÕES

Com a metodologia utilizada e face aos resultados obtidos e discutidos foi possível chegar-se às conclusões apresentadas a seguir.

Os solos estudados apresentaram valores médios de espectros fotoacústicos diferenciados, ao se levar em consideração os formatos das curvas obtidas. Porém, ao se considerar a amplitude de reflectância, a variabilidade dos dados foi alta, não tendo sido possível detectar diferenças significativas entre os espectros representativos das unidades LRd e LE.1.

As razões espectrais entre faixas do visível e do infravermelho eliminaram as diferenças relativas devidas apenas à amplitude de reflectância dos espectros, evidenciando melhor o comportamento espectral dos solos, considerando-se a forma das curvas.

As razões espectrais entre valores extremos da faixa estudada (450-500/800-900 nm) foram eficientes na dis-

criminação entre os três solos estudados, ao nível mínimo de 95% de probabilidade.

O estudo das imagens de transparências coloridas e infravermelhas não revelou diferenças significativas entre as unidades LRd e LE.1, até o nível de 5% de probabilidade, tendo sido possível discriminar, com facilidade, apenas a unidade LV.5 das outras duas.

As imagens de transparências coloridas normais mostraram-se eficientes na discriminação entre cores dos horizontes superficiais de solos expostos.

A razão entre valores de reflectância do espectro fotoacústico nas regiões visível/infravermelho mostrou-se altamente correlacionada com os teores de óxidos de ferro, matiz e porcentagem de argila. Já a matéria orgânica, de maneira geral, apresentou menores coeficientes de correlação, na faixa estudada (450/900nm), com valores de reflectância do espectro fotoacústico.

Os parâmetros de solo, tais como óxidos de ferro, matéria orgânica, cor e granulometria, estão altamente relacionados com a reflectância densitométrica e registros de tonalidade nas imagens aerofotográficas.

Os teores de óxidos de ferro combinados com os de argila ou de matéria orgânica foram as variáveis indicadas para integrarem as equações de regressão múltipla com a reflectância densitométrica, apresentando maior significância nas seguintes faixas:

Filtro vermelho: óxidos de ferro e argila;

Filtro verde: óxidos de ferro e matéria orgânica;

Filtro azul: óxidos de ferro e matéria orgânica.

Entre as características físicas e químicas dos solos, excetuando-se a cor, foram os óxidos de ferro que se apresentaram mais altamente correlacionados à reflectância densitométrica relativa.

As cores Munsell/densitométricas dos solos mostraram-se altamente correlacionadas com os teores de matéria orgânica, argila e óxidos de ferro.

As imagens aerofotográficas estudadas, assim como a análise de espectroscopia fotoacústica e de reflectância densitométrica, mostraram-se eficientes na discriminação dos solos, quando a cor e demais características dos solos a ela associadas são características discriminantes entre as unidades pedológicas.

LITERATURA CITADA

- AL-ABBAS, A.H., P.H. SWAIN e M.F. BAUMGARDNER, 1972. Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. *Soil Sci.* Baltimore, 114(6):477-485.
- ADRIEN, P.M., M.F. BAUMGARDNER C.B. BROWN e J.B. PETERSON, 1982. Characteristic variations in reflectance of saline and alkaline soils of the Bolivian altiplano. *LARS Technical report 120582*. West Lafayette, 59p.
- ALMEIDA, F.F.M., 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. *Bol. Inst. Geogr. Geol.* São Paulo, 41: 167-262.
- AMARAL, A.Z. e AUDI, R., 1972. Fotopedologia. In: MONIZ, A.C. *Elementos de Pedologia*. São Paulo. Editora USP. 35: 429-442.
- AMARAL, G. 1975. *Sensores remotos - aplicações em geociências* São Paulo, Instituto de Geociências. USP. 114 p.
- ANSON, A., 1968. Developments in aerial color photography *Photogram. Eng.*, Falls Church 34: 1048-1057.

- ANSON, A., 1970. Color aerial photos in the reconnaissance of soils and rocks. *Photogram. Eng.*, Falls church, 36: 343-354.
- BAUGMGARDNER, M.F., S.J. KRISTOF, C.J. JOHANNSEN e A.L. ZACHARY, 1970. Effects of organic matter on the multispectral properties of soils. *Indiana Academy of Science*. 79: 413-422.
- BOWERS, S.A e R.J. HANKS, 1965. Reflection of radiant energy from soils. *Soil Sci.* Baltimore, 100: 130-138.
- BROONER, W.G. e D.S. SIMONETT, 1971. Crop discrimination with color infrared photography: a study in Douglas, Kansas. *Remote Sensing of Environment*, New York, 2: 21-35.
- CARNEIRO, M.R. e M.A.D. AZOLIN, 1976. Utilização de imagens MSS do ERTS-1 em levantamentos de solos em comparação com fotografias aéreas verticais. *Rev. Centro de Ciências Rurais*, Sta. Maria R.S. 5(1): 55-66.
- CARROLL, D.M., 1973a. Remote Sensing techniques and their application to soil science: Part I - The Photographic sensors. *Soil and Fertilizers*. Harpender, 36(7): 259-266.
- CARROLL, D.M., 1973b. Remote Sensing techniques and their application to soil science: Part II -The non photographic sensors. *Soil and fertilizers*. Harpender, 36(8): 313-320.
- CHIARINI, J.V. e A.G.S. COELHO, 1969. Cobertura vegetal natural e área reflorestada no Estado de São Paulo, *Bol. Inst. Agronômico* 193. Campinas, 35 p.

- CIHLAR, J. e R. PROTZ, 1972. Color-film densities for soils. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 38: 1091-1098.
- CIHLAR, J. e R. PROTZ, 1973. Surface characteristics of mapping units related to aerial imagery of soils. *Can. J. Soil Sci.* Ottawa, 53: 249-257.
- CIPRA, J.E., M.F. BAUMGARDNER, E.R. STONER e R.B. MACDONALD, 1971. Measuring radiance characteristics of soil with a field spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 35: 1014-1017.
- CIPRA, J.E., D.P. FRANZMEIER, M.E. BAUER e R.K. BOYD, 1980. Comparison of multispectral measurements from some non-vegetated soil using LANDSAT digital data and a spectroradiometer. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 44: 80-84.
- COLWELL, R.N., 1966. Uses and limitations of multispectral remote sensing. *Proc. Symp. on Remote Sensing of the Environment*, 4 th. Ann Arbor, 1: 71-100.
- CONDIT, H.R., 1970. The spectral reflectance of american soils. *Photogram. Eng.* Am. Soc. Photogram., Falls Church. 36(9): 955-965.
- COSTA, L.M., 1979. Surface soil color and reflectance as related to physico-chemical and mineralogical soil properties. Columbia, Univ. of Missouri, 154 p. (Ph.D. Thesis).
- CROWN, P.H. e S. PAWLUK, 1974. Spectral signatures from selected soils in the Edmonton Vegreville Area. In: Second Canadian symposium on remote sensing. Guelph, 11: 449-462.

- DOMINGUES, O., 1960. Comparative analysis of color and black-and-white aerial photography as aids in the mapping of soils in wildland areas. In: *Manual of Photographic Interpretation* 5: 398-402.
- DONZELI, P.L., 1979. *Densitometria em aerofotografias coloridas normais e infravermelhas relacionada às características das cores de três latossolos*. Dissertação de Mestrado Piracicaba, ESALQ. USP. 84 p.
- DRAPER, N.R. e H. SMITH, 1966. *Applied Regression Analysis*. New York, John Willey & Sons, Inc, 407 p.
- EASTMAN KODAK COMPANY, 1972. *Properties of Kodak materials for aerial photographic systems*. Vol. 1 - Kodak aerial films and photographic plates. Rochester, Professional, Comercial and Industrial Markets Division. 75 p.
- ESTES, J.E. e D.S. SIMONETT, 1975. Fundamentals of image interpretation. In: REEVES, R.G., Ed. *Manual of remote sensing*. Falls Church, American Society of Photogrammetry, 2: 869-1076.
- EVANS, R., 1979. Air photos for soil survey in Lowland England: Factors affecting the photographic images of bare soils and their relevance to assessing soil moisture content and discrimination of soils by remote sensing. *Remote Sens. Environm.* New York, 8: 39-65.
- EVANS, R., J. HEAD e M. DIRKZWAGER, 1976. Air photo-tones and soil properties: Implications for interpreting satellite imagery. *Remote Sens. Environ.*, New York, 4: 265-280.

- FORMAGGIO, A.R., 1983. Comportamento espectral de quatro solos do Estado de São Paulo nos níveis orbital, de campo e de laboratório. São José dos Campos, INPE, 91 p. (Tese de Doutorado).
- FORSKARD; F.C. e C.M. WHITTEMORE, C.M. , 1968. Color Aerial Films. In: *Manual of Color Aerial Photography* Am. Soc. of Phot., Falls Church, IV: 196-208.
- FRANÇA, G.V., 1968. Interpretação fotográfica de bacias e de redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. Piracicaba, ESALQ/USP, 151 p. (Tese de Doutorado).
- GARCIA, G.J., 1975. Fotointerpretação comparativa de fotografias pancromáticas, coloridas e infravermelhas coloridas (falsa cor). Piracicaba. ESALQ/USP, 111 p. (Tese de Doutorado).
- GARCIA, G.J. e D.A.B. MARCHETTI, 1977. Fotointerpretação da vegetação através da densitometria. *Anais da ESALQ*. Piracicaba, 34: 275-279.
- GROHMANN, F. e B. VAN RAIJ, 1974. Influência do método de agitação na dispersão de argila do solo. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 14, Santa Maria, RS, p. 123-132.
- HELLER, R.C., 1971. Imaging with photographic Sensors. In: *Remote Sensing*. Nat. Academy Sci. Washington, DC. p. 35-72.
- HOFFER, R.M. e C.J. JOHANSEN, 1969. Ecological Potentials in spectral signature analysis. In: *Purdue University, LARS*.

Remote Sensing technology and applications. Lafayette p. 1-26 (LARS Print 011069-R).

HOFFER, R.M., P.E. ANUTA e T.L. PHILLIPS, 1972. Automatic data processing multiband and multiemulsion digitalized photos. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 38(10): 989-1001.

INPE. INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS, 1975. Banco de Dados *Bol. divulgação.* São José dos Campos, 1(9): 28-37.

INSTITUTO GEOGRÁFICO E GEOLÓGICO, 1974. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo*, Escala 1:1.000.000. São Paulo, 1 f.

JACKSON, M.L., 1956. *Soil Chemical Analysis*. Madison, Wis., 864 f. (mimeografado).

KOFFLER, N.F., 1982. Identificação da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) através de fotografias aéreas infravermelhas coloridas e dados multispectrais do satélite LANDSAT. Piracicaba, ESALQ/USP, 233 p. (Tese de Doutorado).

KRISTOF, S.J., 1971. Preliminary multispectral studies of soils. *J. Soil and Water Cons.*, Ankeny, 26: 15-18.

KRISTOF, S.J. e A.L. ZACHARY, 1971. Mapping soil features from multispectral scanner data. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 40(12): 1427-1434.

- KRISTOF, S.J., M.F. BAUMGARDNER, R.A. WEISMILLER e S. DAVIS, 1980. Application of multispectral reflectance studies of soils: Pre-Landsat. *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data, 6 th.* West Lafayette, II: 52-61.
- KUHL, A.D., 1970, Color and IR photos for soils. *Photogram. Eng.*, Falls Church 36: 475-482.
- LUEDER, D.R., 1959. *Aerial photographic interpretation, principles and applications.* New York, Mc Graw-Hill, 462 p.
- MACE, T.H., 1980. Digital microdensitometric analysis of aerial photographic imagery for detailed soils mapping. *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data, 6 th.* West Lafayette, II: 224-229.
- MARCHETTI, D.A.B. e G.J. GARCIA, 1978. *Princípios de fotogrametria e fotointerpretação.* Livraria Nobel, São Paulo, 257 p. il.
- MATHEWS, H.L., R.L. CUNNINGHAM e G.W. PETERSEN, 1973. Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, Madison, 37: 421-424.
- MAY, G.A. e W. PETERSEN, 1975. Spectral signature selection for mapping unvegetated soils. *Remote Sens. Environ.*, New York 4: 211-220.

- McKEAGUE, J.A., J.H., DAY e J.A. SHIELDS, 1971. Evaluating relationships among soil properties by computer analysis. *Can J. Soil Sci.* Ottawa, 51: 105-111.
- MEDINA, H.P. e F. GROHMANN, 1962. Contribuição ao estudo da análise granulométrica do solo. In: *Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 6., Salvador, BA, Anais. Rio de Janeiro, p. 29-38.
- MONTGOMERY, O.L., 1974. The effects of physical and chemical properties of soil on the spectral reflectance of soils. West Lafayette, Purdue Uni. LARS, 110 p. (M.S. Thesis).
- MONTGOMERY, O.L., M.F. BAUMGARDNER e R.A. WEISMILLER, 1976. *An investigation of the relationship between spectral reflectance and the chemical, physical and genetic characteristics of soils*. West Lafayette, LARS, Purdue University. 147 p.
- MOREIRA-NORDEMANN, L.M., L.A.M. LUCHT e R.P.A. MUNIZ, 1983. *Photoacoust spectroscopy and surface temperature measurements of tropical soils*. INPE-2853 - PRE/393 (relatório interno), São José dos Campos, S.P. 39 p.
- MYERS, V.I., 1979. Crops and soils In: *Manual of Remote Sensing*. Am. Soc. Photogram., Falls Church. 2(22): 1715-1813.
- MYERS, V.I. e W.A. ALLEN, 1968. Electrooptical remote sensing methods as non-destructive testing and measuring techniques in agriculture. *Appl. Optics*. 7(9): 1819-1838.

- OLIVEIRA, J.B. e C.L. ROTTA, 1973. Levantamento pedológico detalhado da Estação de Limeira. *Bragantia*. Campinas, 32(1): 1-60.
- OLIVEIRA, J.B., J.R.F. MENK, J.L. BARBIERI, C.L. ROTTA e W. TREMOCOLDI, 1982. Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Araras. *Bol. Téc. Inst. Agrônômico 71*. Campinas, 180 p.
- PAGE, N.R., 1974. Estimation of organic matter in Atlantic Coastal plain soils with color-difference meter. *Agronomy J.*, Madison, 66: 652-653.
- PARKS, W.L. e R.E. BODENHEIMER, 1973, Delineation of major association using ERTS-1 imagery. In: NASA. *Symposium on significant results obtained from the earth resources technology satellite-1*. New Carrollton, 1: 121-126.
- PARRY, J.T., J.A. HEGINBOTTON e W.R. COWAN, 1969. Soil studies with color photos. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 35: 44-56.
- PENTEADO, M.M., 1968. Geomorfologia do setor centro-ocidental da Depressão Periférica Paulista. Rio Claro, FFCL/UNESP, 160 p. (Tese de Doutorado).
- PETERSON, J.B., R.H. BECK e B.F. ROBINSON, 1979. Predictability of change in soil reflectance on wetting. *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data, 5 th.* West Lafayette, 1: 264-273.

- PIECH, R.K. e J.E. WALKER, 1974. Interpretation of soils. *Photogram. Eng. Am. Soc. Photogram.* 40(1) 87-94.
- PLANET, W.G., 1970. Some coments on reflectance measurements of wet soils. *Remote Sensing of Environment.* New York, 1: 127-129.
- RAY, R.G., 1963. *Fotografias aéreas na interpretação e mapeamento geológico.* Tradução. São Paulo, Inst. Geogr. e Geol. 88 p.
- RIB, H.T., 1968. Color measurements. In: SMITH JUNIOR, J.T., Ed. *Manual of color aerial photography.* Falls Church, American Society of Photogrammetry, p. 12-24.
- RICCI, M. e S. PETRI, 1965. *Princípios de aerofotogrametria e interpretação geológica.* São Paulo. Editora Nacional. 226 p.
- ROSENCWAIG, A., 1977. Solid state photoacoustic spectroscopy. In: YOH-HAN PAO. *Fotoacoustic spectroscopy and detection.* Academic Press, New York. 8: 193-239.
- SCARPACE, F.L., 1978. Densitometry on multi-emulsion imagery. *Photogram. Eng. and Remote Sens.*, Falls Church, 44: 1279-1292.
- SCARPACE, F.L. e G.A. FRIEDERICHS, 1978. Method of determining spectral analitical dye densities. *Photogramm. Eng. and Remote Sens.* Falls Church, 44: 1293-1297.
- STEZER, J., 1966. *Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo.* São Paulo, Comissão Interestadual da Bacia Parana - Uruguai, 61 p.

- SOIL SURVEY STAFF, 1975. *Soil taxonomy - A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey*. Handb. n. 436, US Government Printing Office, Washington, DC, 754 p.
- STEINER, D. e H. HAEFNER, 1965. Tone distortion for automated interpretation. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 31(2): 269-280.
- STONER, E.R. e E.H. HORVATH, 1978. The effect of cultural practices on multispectral response from surface soil. *LARS Technical Report 022278*. West Lafayette, p. 2109-2113.
- STONER, E.R. e M.F. BAUMGARDNER, 1981. Characteristic variations in reflectance of surface soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 45(6): 1161-1165.
- STONER, E.R., M.F. BAUMGARDNER, L.L. BIEHL e B.F. ROBINSON, 1980. Atlas of soil reflectance properties. *Agricultural Experiment Station, Purdue University, Research Bulletin 962*. West Lafayette, 20 p.
- STRANDBERG, C.H., 1968. The language of color. In: *Manual of color aerial photography - Am. Soc. Photogram.*, Falls Church; 1: 3-12.
- TARKINGTON, R.G. e A.L. SOREM, 1963. Color and false color films for aerial photography. *Photogram. Eng.*, Falls Church, 29(1): 88-95.
- VALENTINE, K.W.G., T.M. LORD, W. WATT e A.L. BEDWANY, 1971. Soil mapping accuracy from black and white, color and infrared aerial photography. *Can. J. Soil Sci.*, Ottawa, 51: 461-469.

- VALÉRIO FILHO, M., N.T. HIGA e V.C. CARVALHO, 1976. Avaliação das imagens orbitais (LANDSAT-1) como base para levantamento de solos. São José dos Campos, INPE/CNPq, 247 p. (Dissertação de Mestrado).
- VAN RAIJ, B. e M.A. TEIXEIRA ZULLO, 1977. Métodos de análise de solo. Circular nº 63, *Inst. Agron. Estado de São Paulo*. Campinas, SP, 16 p.
- VANDERBILT, V.C., E.R. STONER, L.L. BIEHL, B.F. ROBINSON, R. A. WEISMILLER e M.E. BAUER, 1980. Fine structure in the spectral reflectance of vegetation and soils. *Proc. Symp. Machine Processing of Remotely Sensed Data, 6 th.*, West Lafayette, II: 358-365.
- WESTIN, F.C. e C.J. FRAZEE, 1976. Landsat data, its use in a soil survey program. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 40: 81-89.
- WEISMILLER, R.A. e S.A. KAMINSKY, 1978. Application of remote-sensing technology to soil survey research. *J. Soil and Water Conserv.*, Ankeny, 33(6): 287-289.

APÊNDICES

- Apêndice 1 - Análise de características físicas e químicas das amostras das três unidades de solo estudadas.
- Apêndice 2 - Densidade ótica (Dx100) das amostras de solo (TFSA).
- Apêndice 3 - Densidade ótica (Dx100) das imagens coloridas normais.
- Apêndice 4 - Densidade ótica (Dx100) das imagens coloridas infravermelhas.
- Apêndice 5 - Espectros óticos de absorção obtidos por espectroscopia fótoacústica para as amostras das unidades de solo estudadas.

Apêndice 1 - Análise de características físicas e químicas das amostras das três unidades de solo estudadas.

Solo	Amostra	% Fe ₂ O ₃	Mat.Or- gânica em Volume	Granulometria %			
				Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
LRd	3.1	15,06	5,69	4,25	21,65	7,65	66,45
	3.2	16,22	6,07	2,20	22,40	8,35	67,05
	3.3	14,54	5,12	3,55	16,70	11,05	68,70
	3.4	10,25	5,31	4,90	24,70	11,30	59,10
	3.5	8,76	4,64	11,25	30,20	6,95	51,60
	3.6	9,60	4,33	21,50	35,70	4,45	38,35
LE.1	2.1	8,31	6,07	5,05	21,35	1,80	71,80
	2.2	9,86	4,81	4,45	29,50	5,70	69,35
	2.3	11,94	6,70	4,35	20,75	6,95	67,95
	2.4	11,62	6,28	6,15	24,55	6,70	62,60
	2.5	10,45	5,12	10,35	20,15	8,45	61,05
	2.6	10,58	4,56	3,90	27,45	11,05	57,60
LV.5	1.1	4,61	4,71	17,90	30,80	6,80	44,50
	1.2	4,41	4,51	4,15	55,10	1,55	39,20
	1.3	1,62	3,30	30,05	33,65	1,10	35,20
	1.4	2,66	4,23	20,60	45,40	0,90	33,10
	1.5	3,31	4,64	5,55	35,25	3,95	55,25
	1.6	2,47	4,23	22,95	44,15	3,40	29,50

Apêndice 2 - Densidade ótica (Dx100) das amostras de solo (T.F.S.A.).

Filtros	Unidade LV.5						Unidade LE.1						Unidade LRd					
	Amostras						Amostras						Amostras					
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
Vermelho	106	103	93	105	94	100	104	103	111	111	114	112	116	109	120	116	108	114
Verde	143	141	123	138	133	133	152	150	158	157	165	161	162	157	166	161	157	157
Azul	170	170	147	164	159	156	177	174	185	184	190	185	186	186	191	187	185	181
Visual	118	115	103	116	107	112	120	119	127	126	131	129	132	125	136	131	124	129

Apêndice 3 - Densidade ótica (Dx100) das imagens coloridas normais.

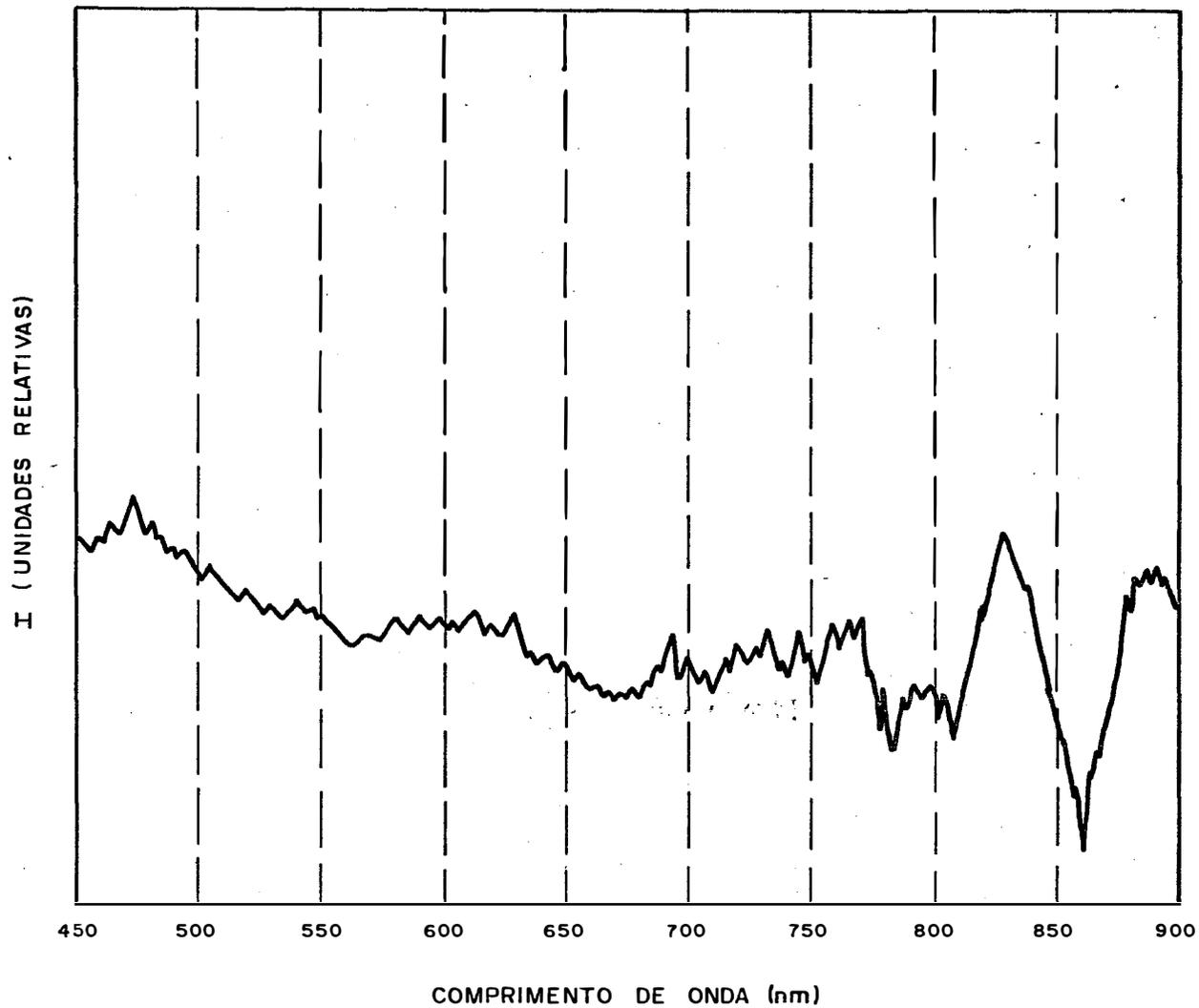
Filtros	Unidade LV.5						Unidade LE.1						Unidade LRd																																									
	1.1		1.2		1.3		1.4		1.5		1.6		2.1		2.2		2.3		2.4		2.5		2.6		3.1		3.2		3.3		3.4		3.5		3.6																			
	Amostras												Amostras												Amostras																													
Vermelho	51	44	41	33	54	42	54	55	62	59	76	64	57	63	82	56	72	62	77	74	67	54	83	70	112	117	121	119	135	123	117	128	130	92	138	120	88	87	84	71	99	83	145	146	150	150	160	150	145	150	152	105	157	148

Apêndice 4 - Densidade ótica (Dx100) das imagens coloridas infravermelhas.

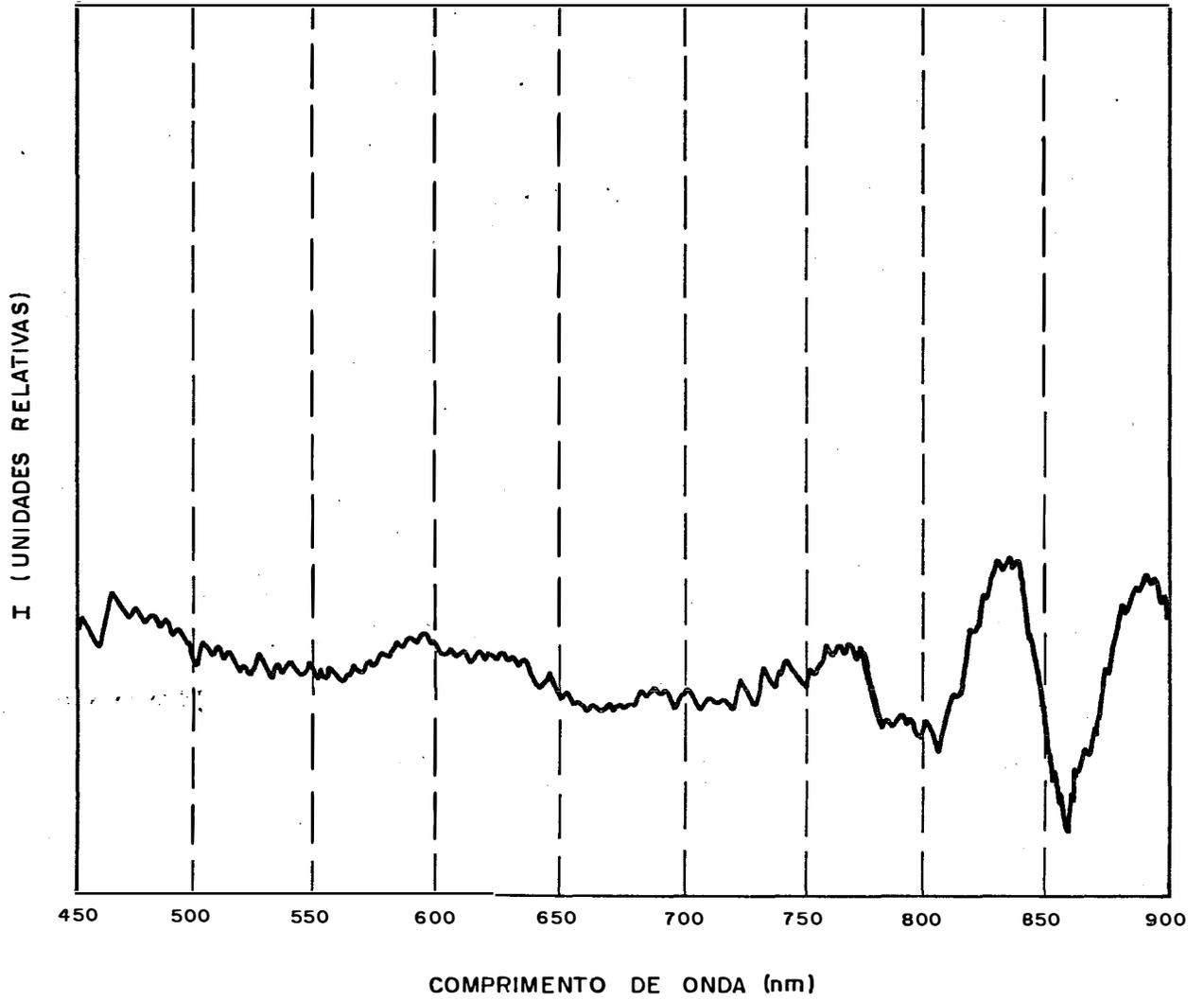
Filtros	Unidade LV.5						Unidade LE.1						Unidade LRd					
	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	61	58	47	45	64	86	146	147	154	146	178	152	157	155	180	188	171	163
Vermelho	82	81	71	66	100	104	142	141	150	138	166	144	154	151	172	179	169	160
Verde	87	83	69	73	102	106	170	168	176	173	185	172	176	171	182	186	186	179
Azul																		

APÊNDICE - 5

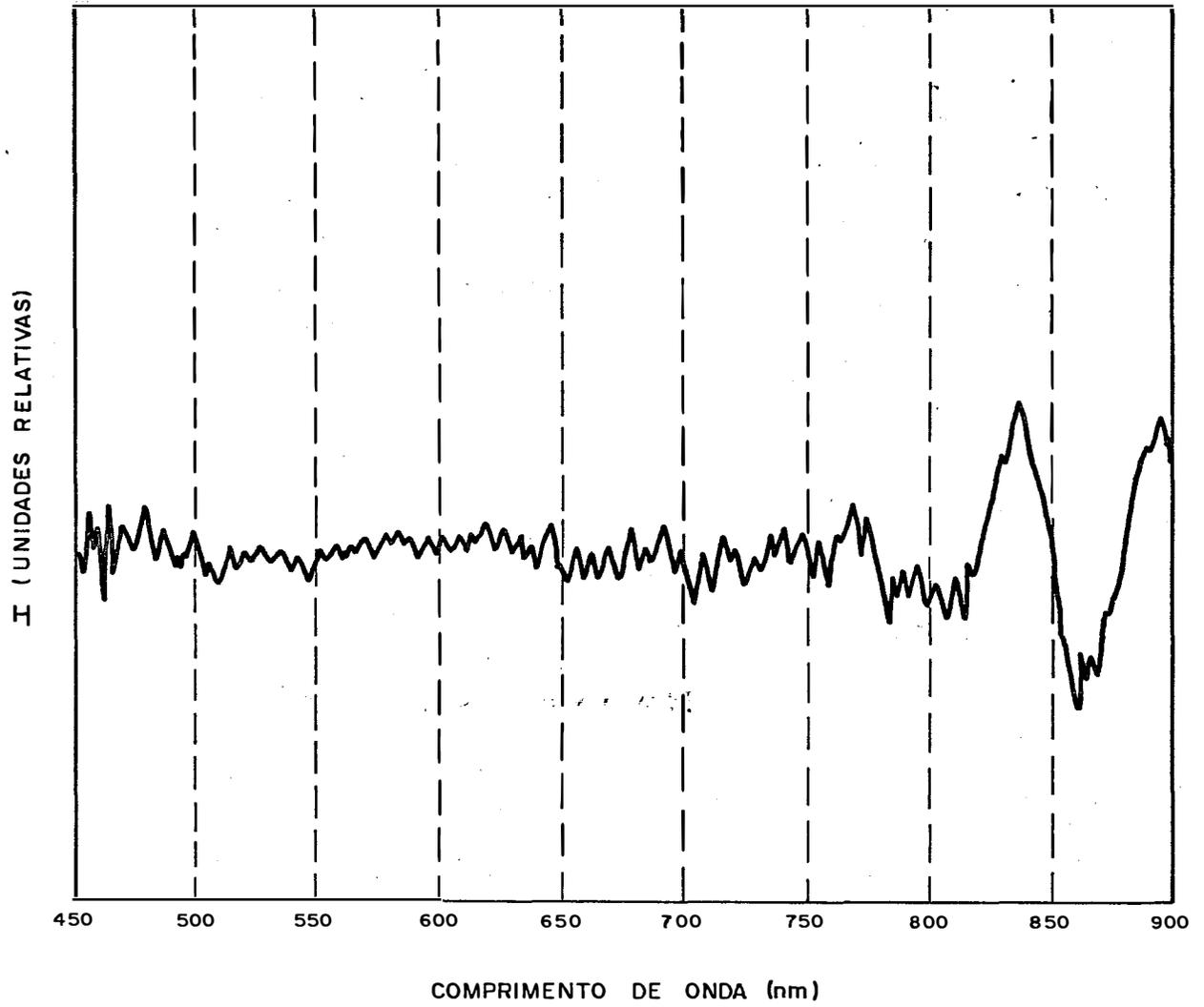
Espectros óticos de absorção obtidos por espectroscopia fotoacústica para as amostras das unidades de solo estudadas.



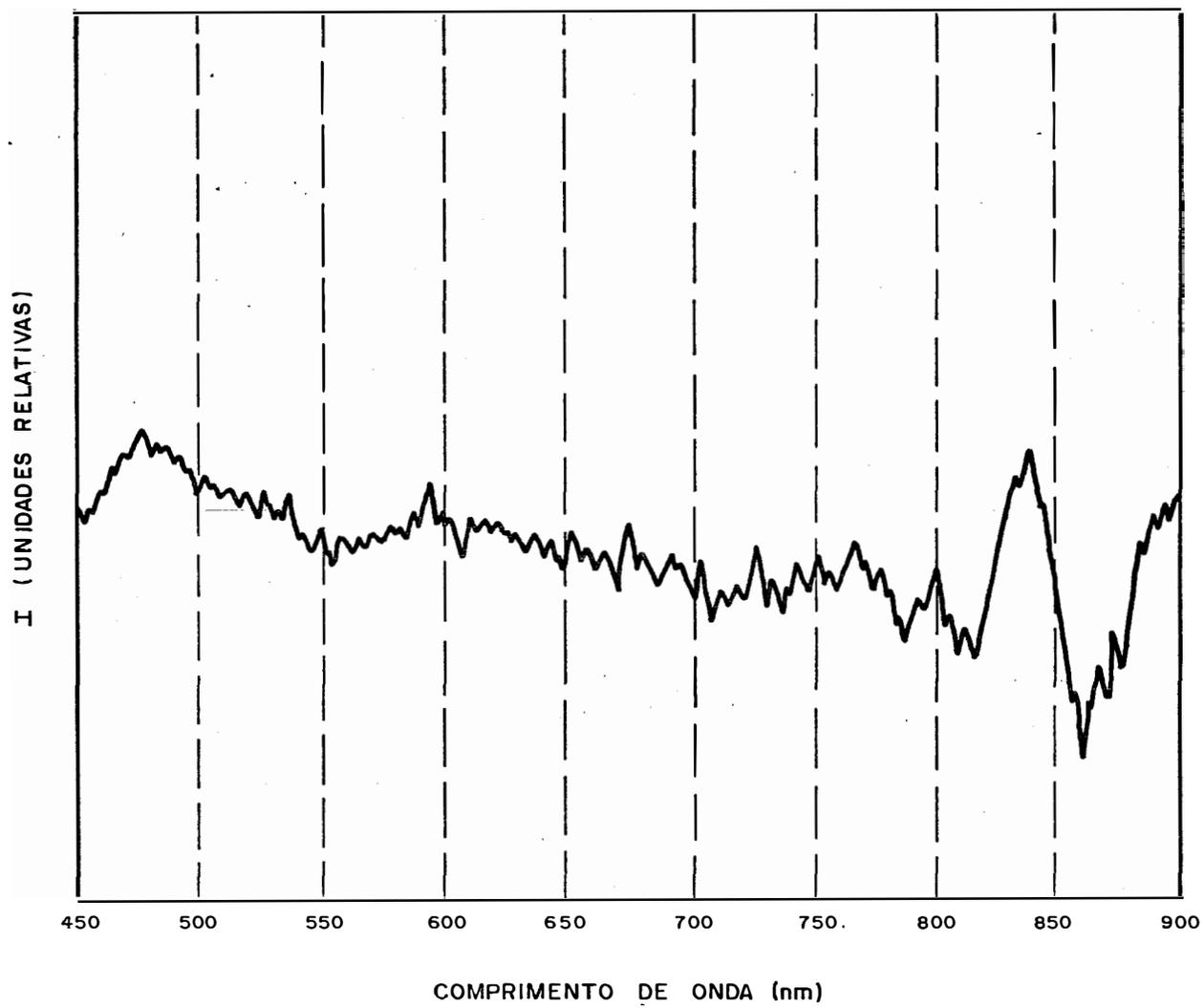
Amostra 1.1 - Unidade LV.5 - Mato Dentro.



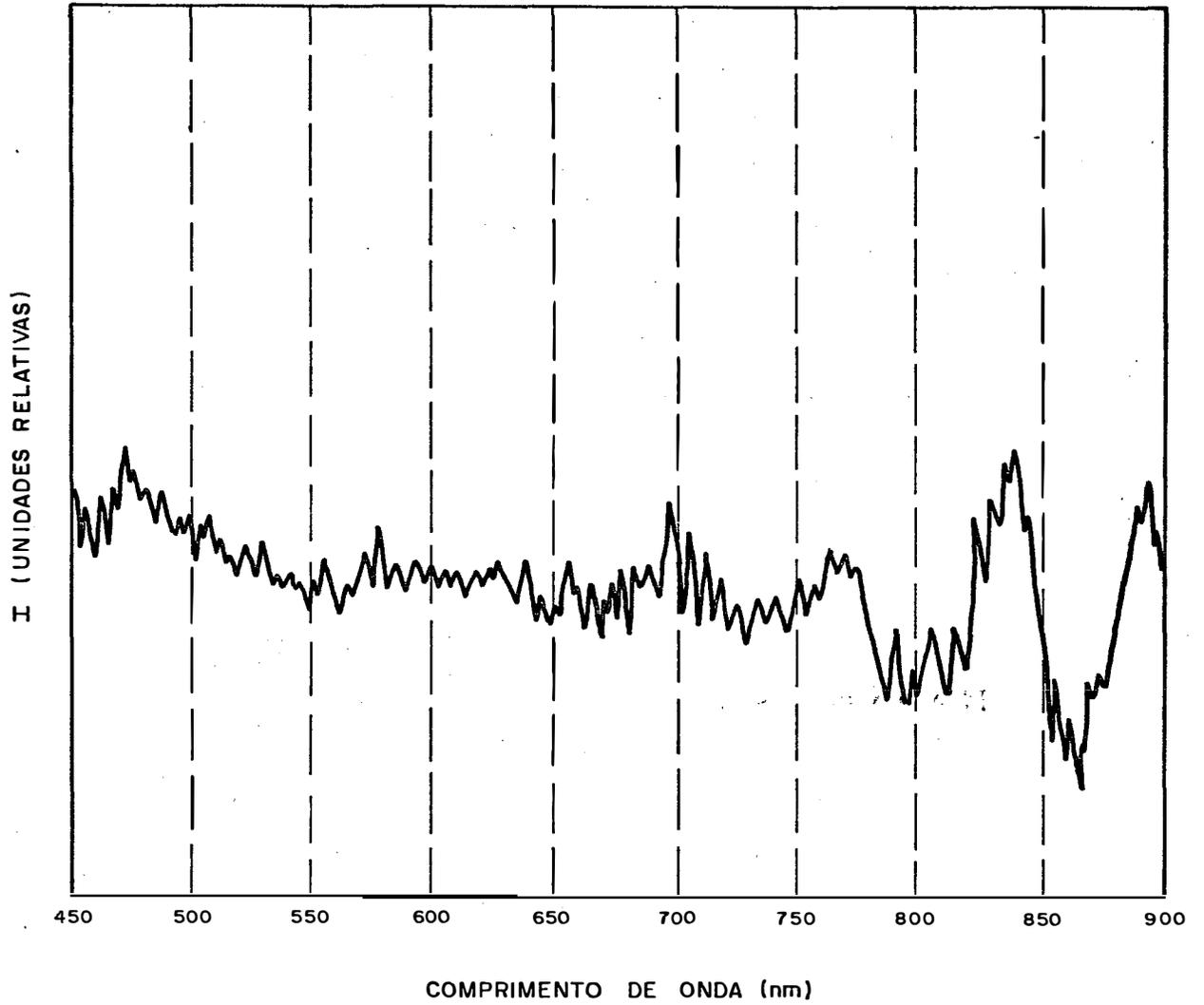
Amostra 1.2 - Unidade LV.5 - Mato Dentro.



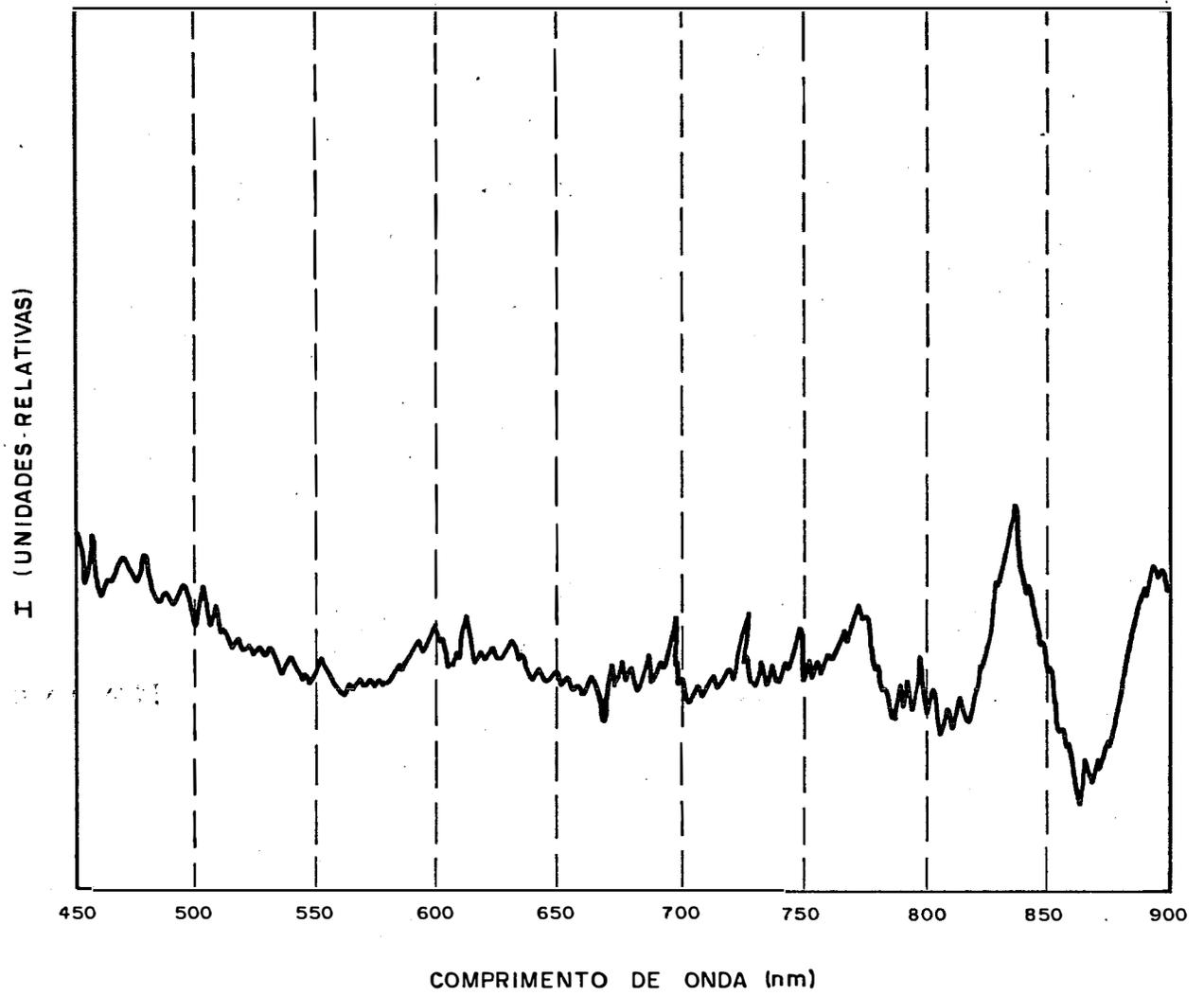
Amostra 1.3 - Unidade LV.5 - Mato Dentro.



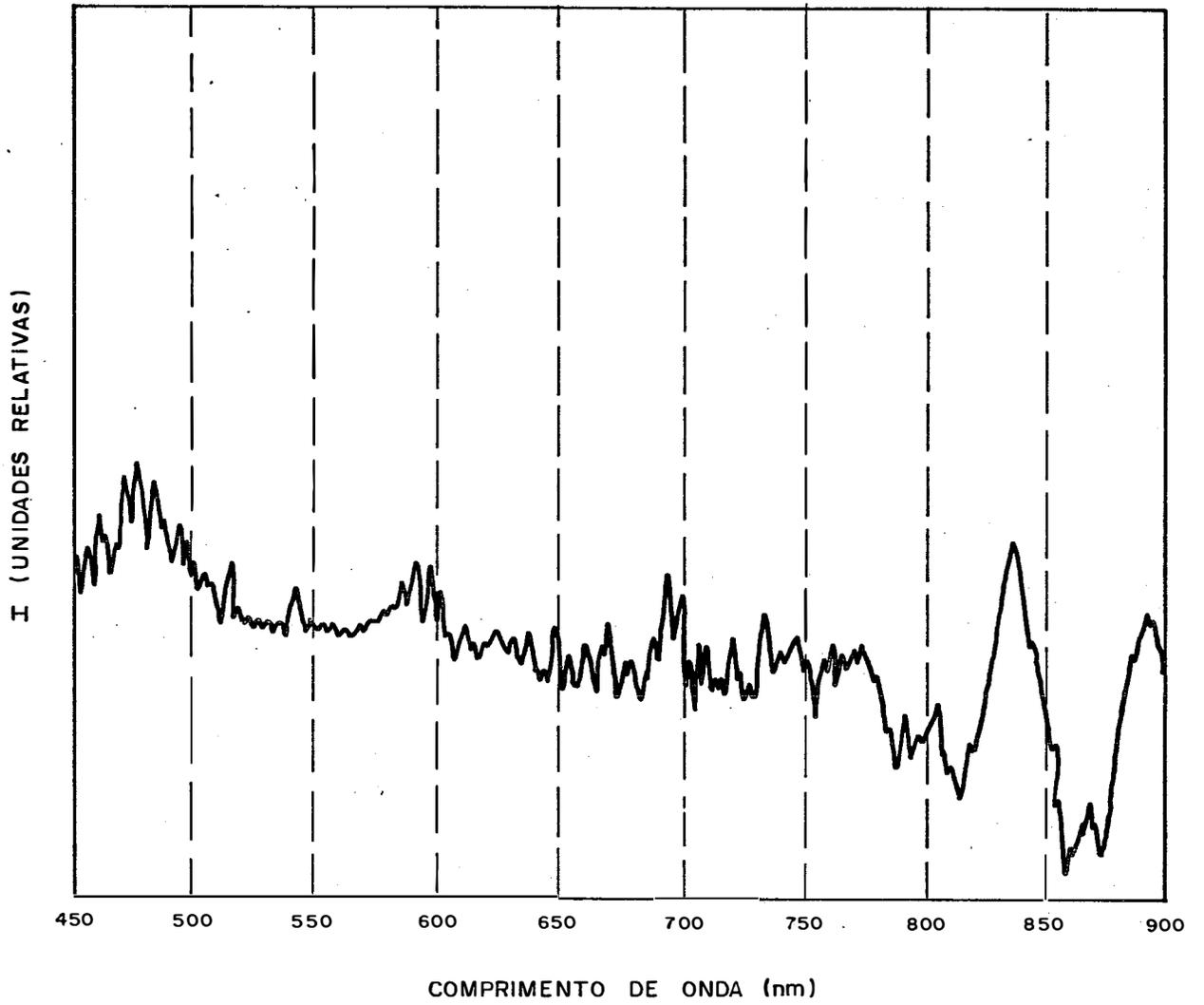
Amostra 2.1 - Unidade LE.1 - Limeira.



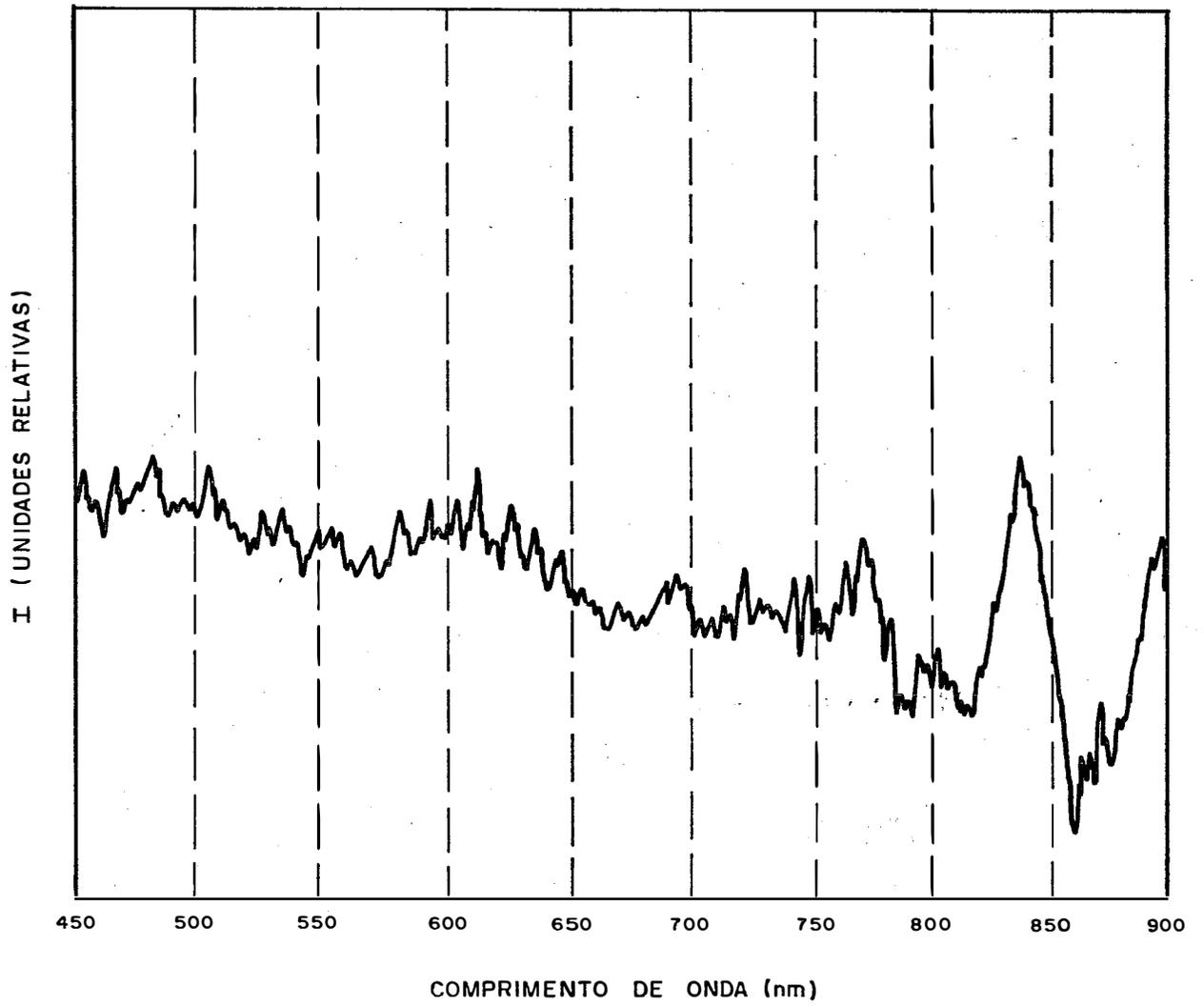
Amostra 2.2 - Unidade LE.1 - Limeira.



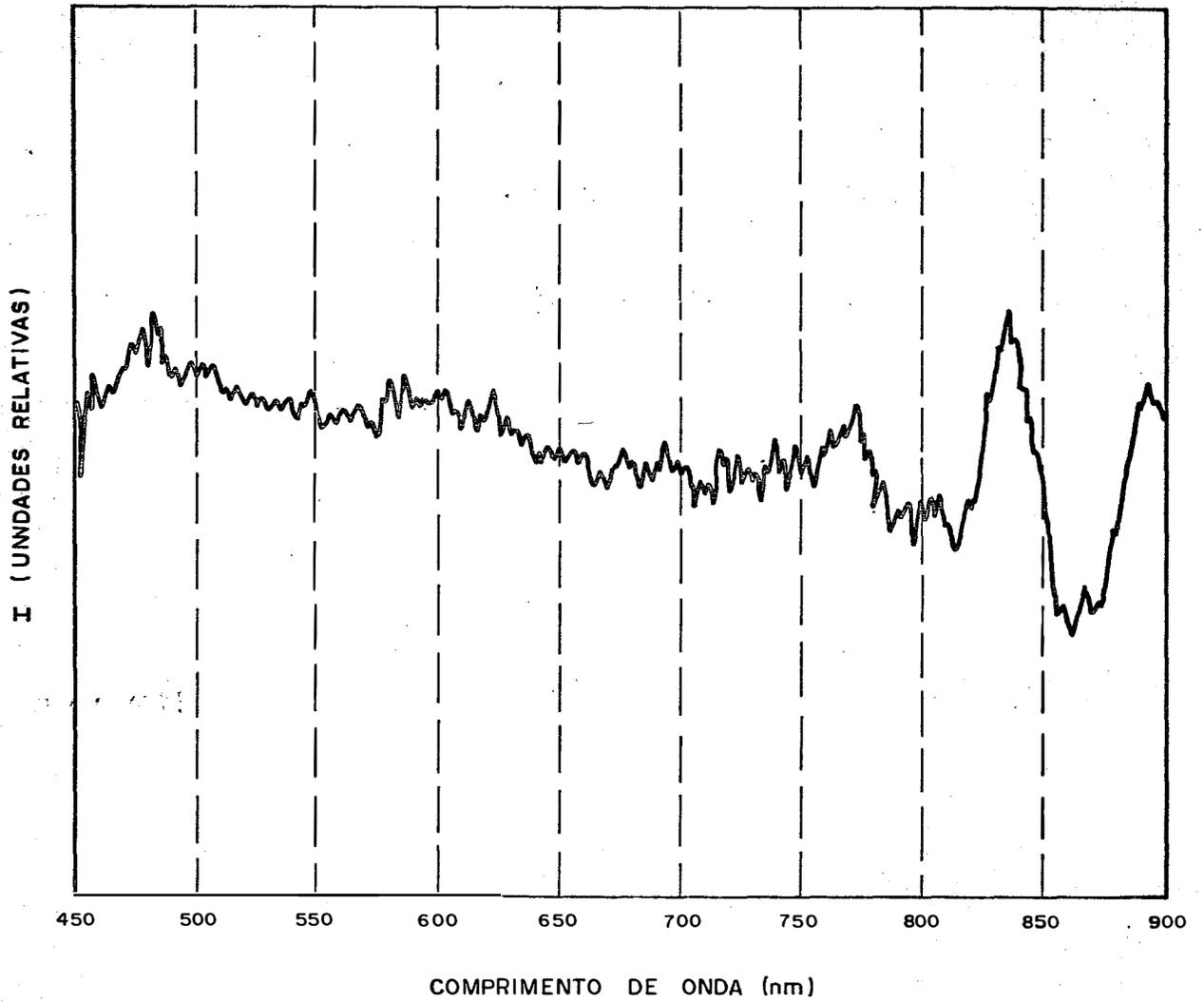
Amostra 2.3 - Unidade LE.1 - Limeira.



Amostra 3.1 - Unidade LRd - Barão Geraldo.



Amostra 3.2 - Unidade LRd - Barão Geraldo.



Amostra 3.3 - Unidade LRd - Barão Geraldo.