

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA UMIDADE NO PERFIL DO SOLO
A PARTIR DE SENSORIAMENTO REMOTO

ARLENE COSTA NASCIMENTO

ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA
CO-ORIENTADOR: NABIL JOSEPH EID

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM - 049/02
BRASÍLIA/DF: MARÇO 2002

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA UMIDADE NO PERFIL DO SOLO A PARTIR DE
SENSORIAMENTO REMOTO

ARLENE COSTA NASCIMENTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS.

APROVADA POR:

NESTOR ALDO CAMPANA, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

NABIL JOSEPH EID, DSc (UnB)
(CO-ORIENTADOR)

SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

JOSÉ DA SILVA MADEIRA NETTO, DSc (CPAC/EMBRAPA)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 25 DE MARÇO DE 2002

FICHA CATALOGRÁFICA

NASCIMENTO, ARLENE COSTA

Avaliação da umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto.

xvi, 91p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2002).

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Umidade do solo
2. Espectrorradiometria
3. Sensoriamento remoto

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

NASCIMENTO, A. C. (2002). Avaliação da umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM 049/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 91p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arlene Costa Nascimento.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação da umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto.

GRAU: Mestre

ANO: 2002

É concedida à Universidade de Brasília permissão para produzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Arlene Costa Nascimento
QNN 17 Conjunto E Casa 40, Ceilândia Norte / DF - Brasil
CEP 72.225 - 170

DEDICATÓRIA

A Deus

A Alipio, meu doce companheiro de todas as horas

À minha querida e divertida família

AGRADECIMENTOS

Aos professores Néstor Aldo Campana e Nabil Joseph Eid;
aos professores Sérgio Koide e Cristina Brandão;
à professora Edi Mendes Guimarães;
ao CNPq;
aos funcionários da UnB: Alessandro, André, Artur, Sr. Bispo, Boy, Divino, Leonardo,
Sr. Lucas e Xavier;
aos bolsistas Giovanni Henke e Giovanni Sansevero;
aos amigos Alan, Betânia, Erika e Jazieli...

...agradeço por tudo.

**AVALIAÇÃO DA UMIDADE NO PERFIL DO SOLO A PARTIR DE
SENSORIAMENTO REMOTO
RESUMO**

O teor de umidade no solo é um dos fatores determinantes de alguns processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, como por exemplo na separação entre as parcelas da precipitação que infiltra e a que esco superficialmente, bem como, é um dado imprescindível para a agricultura. No entanto, dependendo das dimensões de aplicação, os processos tradicionais de obtenção de dados de umidade in situ podem ser lentos e dispendiosos.

Na literatura especializada há relatos de algumas pesquisas, em que se utilizou a resposta espectral da superfície do solo, no intervalo de 0,40 a 2,50 μm , obtida por espectrorradiometria de campo ou por imagens de satélites, para estimativa da umidade nas camadas subsuperficiais do mesmo, incluindo os primeiros 50 cm. Porém, como as metodologias empregadas nessas pesquisas previam a variação da umidade em todo o perfil do solo, não se podia inferir categoricamente a existência de correlação efetiva entre as mudanças no teor de umidade a uma determinada profundidade e a resposta espectral superficial.

Dessa forma, neste trabalho foi utilizada uma metodologia para avaliação da sensibilidade do fator de reflectância bidirecional (FRB) às mudanças no teor de umidade nas camadas subsuperficiais do solo, correspondendo aos primeiros 50 cm, sem a alteração da umidade do solo próximo à superfície. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Hidráulica da UnB, por meio da montagem de duas colunas de solos, em que se aumentaram os teores de umidade no solo por meio da elevação da frente de saturação, no sentido das camadas inferiores até a superfície. Os dados espectrais foram coletados utilizando o espectrorradiômetro GER 2600.

Os resultados obtidos mostram que a espectroscopia de reflectância não é sensível às alterações da umidade no perfil do solo, porque não foram constatadas alterações notáveis no comportamento espectral em resposta à elevação da frente de saturação nas colunas de solo. As mudanças no espectro ocorreram apenas quando a frente de umedecimento alcançou a superfície.

SOIL MOISTURE ESTIMATION IN THE PROFILE USING REMOTE SENSING

ABSTRACT

Soil moisture is one of the most decisive factors in some hydrological processes of a watershed. For example, it is important to separate precipitation portions as infiltration and runoff and an indispensable data for agriculture. However, depending on the application scale, the traditional processes of obtaining soil moisture data *in situ* can be a slow and expensive operation.

The literature reports some researches in which soil spectral response, obtained from field spectroradiometric or satellites images in the 0,40 to 2,50 μm range, was used for estimating moisture in the subsurface layers, including the first 50 cm. Nevertheless, as the methodologies used in such researches foresaw the variation of moisture in whole soil profile, they could not categorically infer the existence of effective correlation among changes in soil moisture at certain depth and its superficial spectral response.

Thus, in this work it was used a methodology to evaluate the bi-directional reflectance factor (BRF) sensitivity to soil moisture changes in the sub superficial layers (first 50 cm) without altering soil moisture near the surface. The research was developed in the UnB's Hydraulics Laboratory, where two soil columns were built. The soil moisture was increased by rising saturation level from base to top. The spectral data were collected using the spectroradiometer GER 2600.

The results suggest that remote sensing from the visible to the short waves infrared interval is not applicable to estimation of moisture in the soil profile, because sensitive alterations of the spectral behavior were not verified in response to the elevation of saturation level in soil columns. The spectral changes occurred only when the saturation level touch the surface.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ESTRUTURA DO TEXTO	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1. CONCEITOS BÁSICOS RELACIONADOS AO SENSORIAMENTO REMOTO	4
2.1.1. Sensoriamento remoto	4
2.1.2. Grandezas radiométricas	5
2.1.3. O espectro eletromagnético	6
2.1.4. A radiação eletromagnética: fontes naturais, interações atmosféricas e aplicações em sensoriamento remoto	7
2.1.5. A radiação eletromagnética e sua interação com os objetos da superfície	11
2.1.5.1. Interações microscópicas	14
2.1.5.2. Interações macroscópicas	15
2.2. FÍSICA DO SOLO	16
2.2.1. Umidade do solo	16
2.2.2. Potencial mátrico	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO SOLO	20
3.1.1. Umidade do solo e comportamento espectral	23
3.1.1.1. Umidade superficial	23
3.1.1.2. Umidade no perfil	25
3.1.2. Teor de matéria orgânica	27
3.1.3. Composição mineralógica	28
3.1.4. Textura / granulometria e rugosidade da superfície	30
3.1.5. Cobertura vegetal	32

3.2. ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO E DE LABORATÓRIO	34
4. METODOLOGIA DO TRABALHO E PROCEDIMENTOS	36
4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	38
4.1.1. O solo e sua coleta	38
4.1.2. Composição granulométrica	39
4.1.3. Teor de matéria orgânica	39
4.1.4. Umidade do solo	39
4.1.5. Análise mineralógica	40
4.1.6. Curva característica	40
4.1.7. Curva de compactação do solo	42
4.2. AMBIENTE DE TRABALHO E EQUIPAMENTO PARA COLETA DE DADOS ESPECTRAIS	42
4.2.1. Ambiente de trabalho	42
4.2.2. O espectrorradiômetro GER 2600, sua instalação e utilização	43
4.3. ETAPA DE TESTES PRELIMINARES	45
4.3.1. Definição da geometria fonte-alvo-sensor e comparação entre os espectros da lâmpada e do Sol	45
4.3.2. Avaliação da tensão da rede elétrica	46
4.3.3. Avaliação dos efeitos de adjacência	47
4.4. ETAPA PRINCIPAL	48
4.4.1. Estrutura das colunas de solo	48
4.4.2. Montagem das colunas de solo	49
4.4.2.1. Compactação do solo nas colunas	49
4.4.2.2. Instalação dos tensiômetros de vácuo	51
4.4.3. Molhamento das colunas de solo e coleta de dados	53
4.4.4. Corpos de prova cilíndricos	55
5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	56
5.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	56

5.1.1. Granulometria	56
5.1.2. Matéria orgânica	57
5.1.3. Umidade do solo	57
5.1.4. Análise mineralógica	59
5.1.5. Curva característica	61
5.1.6. Curva de compactação do solo	63
5.2. TESTES PRELIMINARES	64
5.2.1. Comparação entre os espectros da lâmpada e do Sol e identificação de ruídos	64
5.2.2. Avaliação dos efeitos de adjacência	68
5.3. ETAPA PRINCIPAL	71
5.3.1. Ensaios nas colunas de solo	71
5.3.2. Corpos de prova cilíndricos	83
6. CONCLUSÕES	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS EM <i>APUD</i>	91

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Termos radiométricos	5
Tabela 2.2 - Intervalos de comprimentos de onda utilizados em sensoriamento remoto, respectivas fontes de radiação e propriedades avaliadas	11
Tabela 2.3 - Métodos para determinação da umidade do solo <i>in situ</i>	17
Tabela 2.4 - Métodos para determinação do potencial matricial <i>in situ</i>	17
Tabela 5.1 - Umidade do solo (%) associada ao intervalo de tempo (h) utilizando estufas a 105 ° e 55 ° C para secagem	58
Tabela 5.2 - Matéria orgânica após processo de secagem	59
Tabela 5.3 - Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo na coluna 1	75
Tabela 5.4 - Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo na coluna 2	76
Tabela 5.5 – Áreas e alturas das bandas de absorção da água próximas a 1,45 e 1,95 μm	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática de ângulo sólido	6
Figura 2.2 - O espectro eletromagnético	7
Figura 2.3 - (a) Distribuição espectral da energia radiante de corpos negros em várias temperaturas e (b) comparação entre a energia radiante da Terra e do Sol em função das respectivas temperaturas	8
Figura 2.4 - Curvas de irradiância solar e de um corpo negro à temperatura de 5.900 K	9
Figura 2.5 - Transmissão da radiação eletromagnética através da atmosfera	10
Figura 2.6 - Parâmetros geométricos que descrevem a reflexão de uma superfície	13
Figura 2.7 - Reflexões de raios de radiação eletromagnética entre as partículas em função da esfericidade e compactação dos grãos	15
Figura 2.8 - Curva característica da água em um solo	18
Figura 3.1 - Espectros de reflectância representativos de horizonte superficial de solos: (a) forma dominada pela matéria orgânica; (b) forma minimamente alterada; (c) forma afetada pelo ferro; (d) forma afetada pela matéria orgânica e (e) forma dominada pelo ferro	22
Figura 3.2 - Comportamento espectral de uma argila siltosa em função do conteúdo de umidade	23
Figura 3.3 - Exemplos de reflectância (a) especular e (b) difusa	31
Figura 3.4 - Curva média do comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa	33
Figura 4.1 - Esquema ilustrativo das etapas do trabalho	36
Figura 4.2 - (a) Célula de pressão e (b) Quadro Manifold	41
Figura 4.3 - Curva de calibração da placa de referência fornecida pelo fabricante	44
Figura 4.4 - Geometria fonte-alvo-sensor	46
Figura 4.5 - Corpos de prova cilíndricos	47
Figura 4.6 - Configuração física das colunas de solo	49
Figura 4.7 - Compactação e transporte das colunas de solo: (a) macaco hidráulico e portal de aplicação de carga; (b) compactação em camadas; (c) vedação e fechamento da coluna e (d) transporte da coluna	50

Figura 4.8 - Tensiômetros: (a) tradicional e (b) adaptado para instalação na lateral das colunas de solo	52
Figura 4.9 - Perfil de água no solo	53
Figura 4.10 - Coleta de dados espectrais nas colunas de solo: (a) locação das colunas e equipamentos sobre os tablados; (b) cabana para coleta de dados e (c) coleta de dados	54
Figura 5.1 - Curva granulométrica	56
Figura 5.2 - Difratoograma de raios-X do solo estudado	60
Figura 5.3 - Difratoogramas de raios-X do solo estudado e de amostras padronizadas (proporções relativas de gibsita : caulinita : quartzo)	61
Figura 5.4 - Curva característica do solo estudado	62
Figura 5.5 - Curvas características obtidas por Lima (2002)	62
Figura 5.6 - Curva de compactação estática do solo para diferentes pressões	63
Figura 5.7 - Curvas representativas da radiância e reflectância da placa <i>spectralon</i> tendo como fontes de iluminação o Sol e a lâmpada (com ângulo de iluminação de 15°)	64
Figura 5.8 - Curvas espectrais da placa <i>spectralon</i> coletadas na cabana 1, na cabana alternativa e sob o Sol	67
Figura 5.9 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos submetidos a diferentes condições de borda: (a) solo seco e (b) solo úmido	69
Figura 5.10 - Curvas espectrais dos círculos de papel e do fundo preto utilizados na avaliação dos efeitos de adjacência	70
Figura 5.11 - Curvas espectrais da coluna de solo 1 obtidas com a progressiva elevação da frente úmida	73
Figura 5.12 - Curvas espectrais da coluna de solo 2 obtidas com a progressiva elevação da frente úmida	74
Figura 5.13 - Curvas espectrais normalizadas em função da leitura (0) - coluna 1	81
Figura 5.14 - Curvas espectrais normalizadas em função da leitura (0) - coluna 2	82
Figura 5.15 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos	83
Figura 5.16 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos em função da leitura Solo seco prof. 10,0 cm	84

LISTA DE ABREVIATURAS / SÍMBOLOS

FDRB - Função de distribuição de reflectância bidirecional

FRB - Fator de reflectância bidirecional

m.c.a - metro de coluna d'água

TDR - *Time domain reflectometry*

TM - *Thematic Mapper*

a - absorbância [*adimensional*]

Dt - intervalo de tempo [s]

DA - área da amostra [m^2]

ϵ - emissividade [*adimensional*]

f - fluxo de energia [J/s]

θ e θ' - ângulo zenital

l - comprimento de onda [m]

mm - micrômetro

θ - ângulo de Bragg (complemento do ângulo de incidência)

Q_{grav} - umidade gravimétrica [*adimensional*]

r - reflectância [*adimensional*]

S - constante de Stefan-Boltzmann [$5,6697 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$]

ρ_e - massa específica [kg/m^3]

W - ângulo sólido [sr]

t - transmitância [*adimensional*]

u - velocidade de propagação da radiação [m/s]

ϕ - ângulo azimutal [°]

y_g - potencial gravitacional [*m.c.a.*]

y_m - potencial mátrico [*m.c.a.*]

y_{os} - potencial osmótico [*m.c.a.*]

y_t - potencial total [*m.c.a.*]

° - grau

Å - Ångstron

B - constante [2.898 *mm.K*]

c - velocidade da luz [*m/s*]

cm - centímetro

d - distância entre os planos de um cristal

D - diâmetro da base do cone [*m*]

E - irradiância [*W/m²*]

E_l - irradiância espectral [*W/(m².nm)*]

f - frequência [*Hz*]

h - variação da altura da superfície [*m*]

h_p - constante de Planck [*J.s*]

Hz - hertz

i e j - ângulos de incidência da radiação com a normal à superfície considerada [°]

J - joule

K - Kelvin

L - radiância [*W/(m².sr)*]

L_l - radiância espectral [*W/(m².sr.nm)*]

m - metro

M - excitância [*W/m²*]

M_l - excitância espectral [*W/(m².nm)*]

mm - milímetro

n - índice de refração [*adimensional*]

n_i - um número inteiro correspondente à ordem de difração

Q - quantidade de energia quântica radiante [J]

r - raio de esfera [m]

s - segundo

sr - esterradiano

T - temperatura absoluta [K]

v - volume [m^3]

V - volts

1. INTRODUÇÃO

A variação espacial e temporal do conteúdo de umidade na superfície do solo é de grande importância para pesquisas hidrológicas, uma vez que a umidade do solo tem papel fundamental na separação entre a parcela da precipitação que infiltra e a que gera o escoamento, bem como na separação da radiação termal em calor latente e sensível (Mattikalli *et al.*, 1996). Além disso, a variação espacial e temporal da umidade está relacionada diretamente com alguns fatores que condicionam a infiltração e a evaporação, tais como áreas de recarga e descarga do lençol freático, áreas de contribuição para picos de escoamento, regiões com distintos potenciais de evapotranspiração e propriedades hidrológicas do solo (Engman, 1997).

A determinação dos teores de umidade no perfil do solo também é imprescindível no campo da agricultura, possibilitando o uso racional da água por meio da otimização de algumas operações do dia-a-dia, como, por exemplo, na programação dos turnos de rega para irrigação.

Portanto, é mister a obtenção de dados de umidade em função de sua variação espacial e temporal. Essas variações são resultantes da não uniformidade das taxas de precipitação e de evaporação, da heterogeneidade da cobertura e das propriedades dos solos, da topografia e das condições atmosféricas, dentre outras.

Normalmente, há necessidade de monitoramento de teores de umidade em extensas áreas tendo como requisitos baixo custo, grande quantidade de dados e rapidez, simultaneamente. Surge, daí, a possibilidade de emprego de produtos de sensoriamento remoto em nível orbital aliados aos sistemas de informação geográfica. Em algumas situações, o sensoriamento remoto nos intervalos do infravermelho termal e microondas apresenta melhor performance no monitoramento da umidade do solo (Engman, 1991 e Schmugge, 1980). Porém, o sensoriamento remoto no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas tem se mostrado mais operacional devido à vasta disponibilidade de imagens da superfície terrestre com diferentes resoluções espaciais. No entanto, todos os intervalos espectrais, sejam do visível ao infravermelho de ondas curtas, termal ou microondas, possuem limitações, não sendo utilizados, ainda, para prever rotineiramente a umidade do solo (Muller e Décamps, 2000). A utilização desses produtos exige o conhecimento das relações existentes entre as grandezas medidas e as características do solo.

Dada essa problemática, nesta pesquisa será avaliada a correlação existente entre a umidade nas camadas subsuperficiais do solo e dados de sensoriamento remoto de reflectância no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas por meio de metodologia desenvolvida em escala de laboratório, utilizando-se de uma fonte de radiação eletromagnética artificial.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a possibilidade de emprego de sensoriamento remoto, utilizando-se de dados de reflectância no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas, como uma ferramenta para estimativa da umidade na camada subsuperficial do solo, ou seja, na camada correspondente aos primeiros 50 cm centímetros a partir da superfície. Para tanto, pretende-se, em escala de laboratório, constatar a ocorrência, ou não, de alterações na resposta espectral em função do teor de umidade nas camadas subsuperficiais de um latossolo vermelho-escuro.

Os objetivos secundários se restringem à analisar as relações entre o comportamento espectral do solo e seus principais fatores determinantes, tais como a presença de óxidos de ferro, a textura do solo, o teor de matéria orgânica, entre outros.

1.2. ESTRUTURA DO TEXTO

O texto possui 7 capítulos, apresentados na seguinte ordem: 1 - introdução; 2 - fundamentação teórica; 3 - revisão bibliográfica; 4- metodologia do trabalho e procedimentos; 5 - resultados obtidos e discussões e 6 - conclusões e recomendações.

O capítulo 2 corresponde a uma síntese dos principais conceitos de sensoriamento remoto e de física dos solos empregados ao longo do trabalho.

O capítulo 3 reúne as principais experiências descritas na literatura, além de apresentar breves discussões sobre os resultados obtidos pelos diversos autores.

No capítulo 4, tem-se um relato da metodologia proposta e alguns procedimentos envolvidos na consecução da mesma.

O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e discussões concernentes.

Por fim, no capítulo 6, têm-se as principais conclusões e recomendações resultantes deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONCEITOS BÁSICOS RELACIONADOS AO SENSORIAMENTO REMOTO

2.1.1. Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é largamente definido como a tecnologia que permite a aquisição de informações sobre objetos na superfície terrestre sem contato físico com os mesmos, por meio do registro e da análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta Terra (Novo, 1992).

Essa energia propaga-se pela atmosfera em forma de radiação eletromagnética, comportando-se como uma onda carregada de fótons de energia (Meneses, 2000a).

A radiação eletromagnética pode ser caracterizada por seu comprimento de onda, frequência e velocidade de propagação:

$$c = \lambda \cdot f \quad (2.1)$$

em que c é a velocidade da luz [m/s], λ é o comprimento de onda [m] e f é a frequência [Hz].

De acordo com Meneses (2000a), existem duas teorias que explicam a propagação da energia a partir de uma fonte, denominadas modelo ondulatório e modelo corpuscular.

O modelo ondulatório postula que a energia se propaga por meio de movimento ondulatório. Já, segundo o modelo corpuscular, a radiação eletromagnética apresenta propriedades de natureza quântica, manifestada nos processos de sua emissão ou absorção pela matéria, ou seja, é composta por diversas partículas denominadas *quanta*. A energia de um *quantum* é dada por:

$$Q = h_p \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2.2)$$

em que Q é a quantidade de energia quântica [J], h_p é a constante de Planck [$6,625 \cdot 10^{-34} J \cdot s$], c é a velocidade da luz [m/s] e λ é o comprimento de onda [m].

Portanto, a quantidade de energia disponível para interação com os objetos é inversamente proporcional ao comprimento de onda, de tal sorte, que a interação entre

radiação eletromagnética e matéria, considerando devidamente suas propriedades físico-químicas, será função do comprimento de onda.

As duas teorias são complementares e a predominância de uma sobre a outra depende do comprimento de onda em avaliação, sendo que a teoria corpuscular estará mais associada a interações microscópicas e a teoria ondulatória a interações macroscópicas.

2.1.2. Grandezas radiométricas

A avaliação das quantidades de energia radiante é feita pela radiometria. Os principais termos utilizados na radiometria são a energia radiante, o fluxo radiante, a irradiância, a excitância e a radiância (tabela 2.1).

A energia radiante (Q) é a grandeza radiométrica fundamental que indica a quantidade de energia associada a um fluxo de radiação (f), que é definido como a taxa de variação da quantidade de energia radiante na unidade de tempo. Por sua vez, a irradiância (E) é a razão entre o fluxo radiante que incide sobre um alvo qualquer e a área de sua superfície e a excitância (M) é a razão entre o fluxo que deixa um alvo qualquer e sua área, após sua reflexão ou emissão. Já a radiância (L) é o fluxo radiante, por unidade de ângulo sólido, que deixa uma fonte em uma dada direção, por unidade de área perpendicular àquela direção.

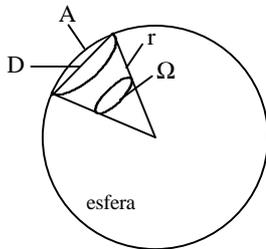
Tabela 2.1 - Termos radiométricos

Quantidade de energia radiante	$DQ [J]$
Fluxo radiante	$f [W] = \frac{\Delta Q [J]}{\Delta t [s]^{(a)}}$
Irradiância fluxo radiante incidente sobre alvo	$E [W.m^{-2}] = \frac{\Delta f [W]^{(b)}}{\Delta A [m^2]^{(c)}}$
Excitância	$M [W.m^{-2}] = \frac{\Delta f [W]^{(d)}}{\Delta A [m^2]^{(c)}}$
Radiância	$L [W.m^{-2}.sr^{-1}] = \frac{\Delta f [W]}{\Delta \Omega [sr]^{(e)}.(\Delta A [m^2].\cos \varphi)^{(f)}}$

Fonte: adaptado de Steffen (1996)

^(a) Δt é o intervalo de tempo; ^(b) fluxo radiante incidente sobre o alvo; ^(c) ΔA é a área do alvo; ^(d) fluxo radiante que deixa o alvo; ^(e) $\Delta \Omega$ é o ângulo sólido e ^(f) $\Delta A \cdot \cos \varphi$ é o valor da área da amostra projetada na direção considerada 5

Um ângulo sólido (Ω) em esterradianos (sr) é definido pela razão entre a área da esfera interceptada por um cone e o quadrado do raio desta, como mostrado na figura 2.1.



$$\text{ângulo sólido } \Omega(sr) = \frac{A}{r^2}$$

em que A é a área da calota da esfera subtendida pelo cone, r é o raio da esfera e D é o diâmetro da base do cone

Figura 2.1 - Representação esquemática de ângulo sólido

Fonte: Novo (1992)

Se a irradiância, a excitância e a radiância referirem-se a um dado comprimento de onda, as mesmas serão denominadas irradiância espectral [E_λ em $W/(m^2 \cdot nm)$], excitância espectral [M_λ em $W/(m^2 \cdot nm)$] e radiância espectral [L_λ em $W/(m^2 \cdot sr \cdot nm)$].

2.1.3. O espectro eletromagnético

O espectro eletromagnético (figura 2.2) é subdividido em faixas, relacionadas com as fontes de emissão e meios de detecção comuns.

O comprimento de onda (λ) possui dimensão linear, sendo normalmente expresso em micrômetro [μm], no entanto, dependendo da ordem de grandeza no espectro eletromagnético, é praxe referir-se em outros submúltiplos do metro [m], como Ångstron [Å], nanômetro [nm] e milímetros [mm].

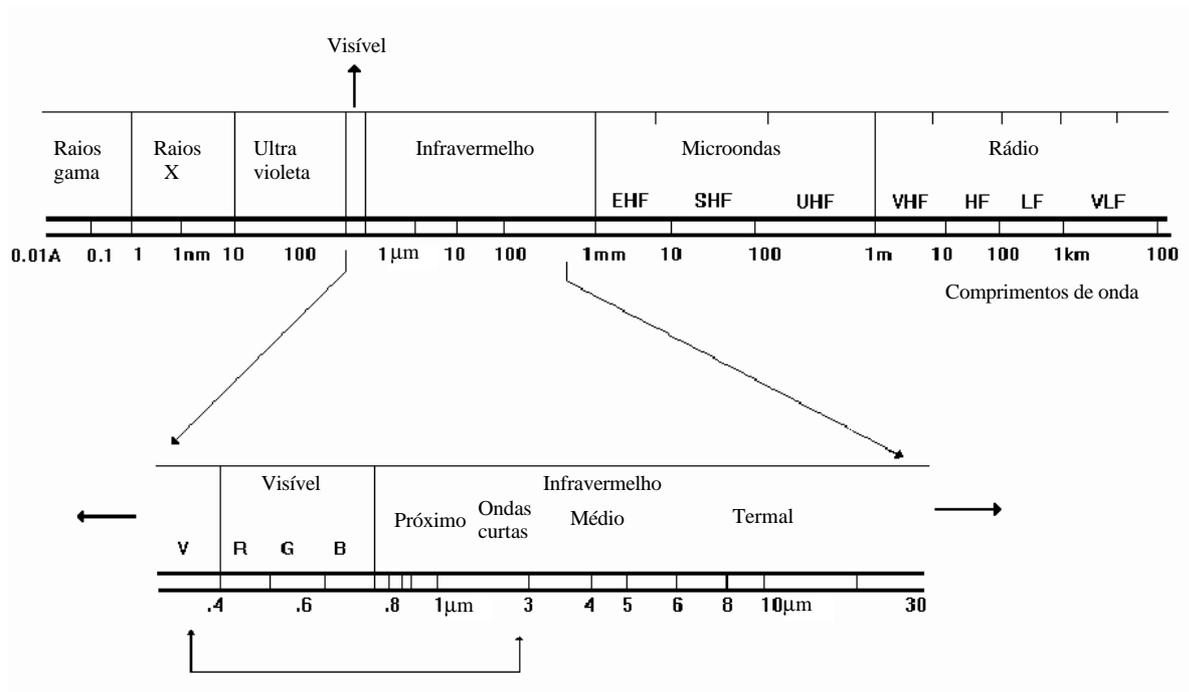


Figura 2.2 - O espectro eletromagnético

Fonte: adaptado de DPI (2002)

2.1.4. A radiação eletromagnética: fontes naturais, interações atmosféricas e aplicações em sensoriamento remoto

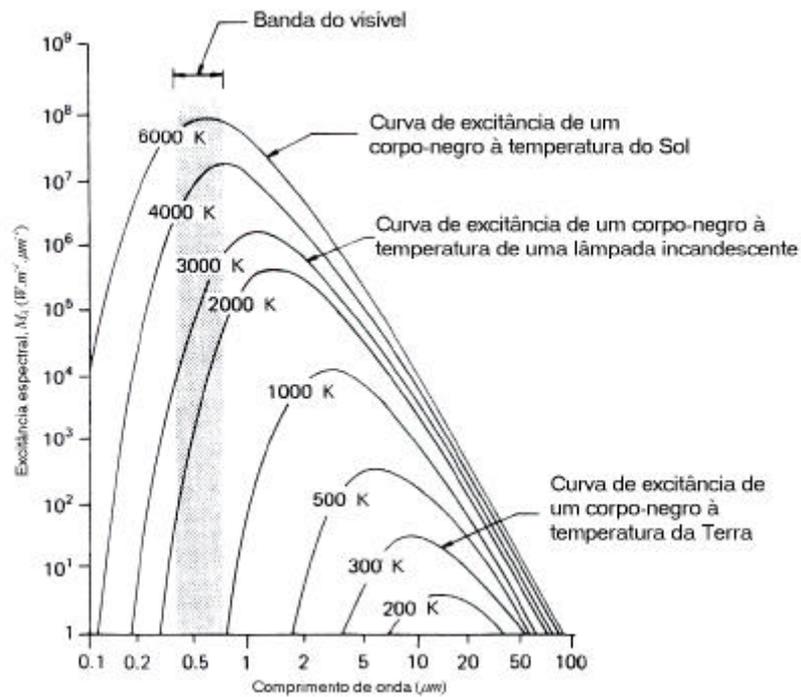
As principais fontes naturais de radiação eletromagnética para sensoriamento remoto são o Sol e a Terra, sendo que a energia radiante na unidade de tempo e de área de cada um é dada pela lei de Stefan-Boltzmann, segundo a qual, a excitância de uma superfície é função de sua temperatura:

$$M = s \cdot T^4 \quad (2.3)$$

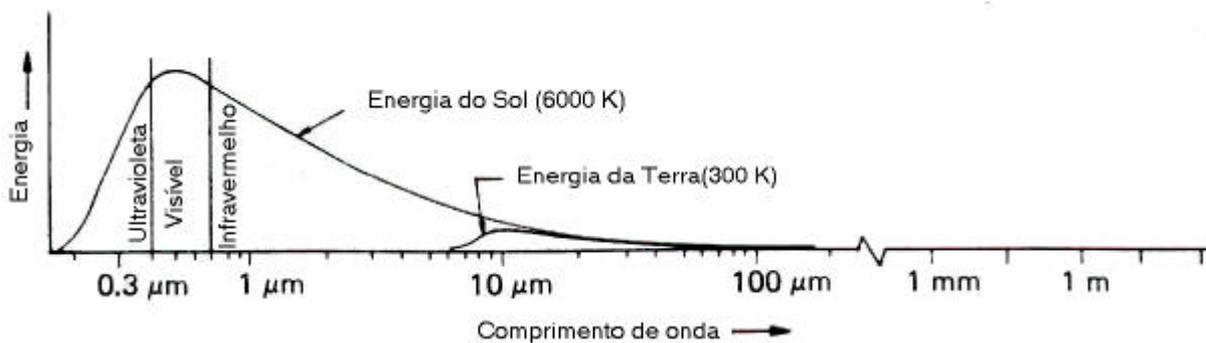
em que M é a excitância [W/m^2], s é a constante de Stefan-Boltzmann [$5,6697 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$] e T é a temperatura absoluta do material [K].

Portanto, qualquer objeto com temperatura acima do zero absoluto emite continuamente radiação eletromagnética. Porém, a equação (2.3) é válida somente para fontes de energia que se comportam como corpo negro (superfície hipotética que absorve e reemite toda a energia incidente sobre a mesma). A figura 2.3 (a) mostra a excitância espectral de

corpos negros com temperaturas entre 200 e 6000 K e na figura 2.3 (b) é apresentada uma comparação entre a radiação proveniente do Sol e da Terra em função das respectivas temperaturas.



(a)



(b)

Figura 2.3 - (a) Distribuição espectral da energia radiante de corpos negros em várias temperaturas e (b) comparação entre a energia radiante da Terra e do Sol em função das respectivas temperaturas

Fonte: Lillesand e Kiefer (1994)

O comprimento de onda em que ocorre o máximo de excitância para cada corpo com diferentes temperaturas é dado por:

$$l_m = \frac{B}{T} \quad (2.4)$$

em que l_m é o comprimento de onda referente à máxima excitância [mm], B é uma constante [2.898 mm.K] e T é a temperatura [K].

Portanto, quanto maior a temperatura do corpo menor será o comprimento de onda onde ocorre a máxima excitância, sendo que para o Sol a máxima excitância ocorre em $0,5 \mu\text{m}$, já o pico de excitância da Terra ocorre em $9,5 \mu\text{m}$, aproximadamente. A figura 2.4 representa graficamente a energia radiante do Sol (expressa pela irradiância solar sobre a Terra, em diversas altitudes, para comprimentos de onda no intervalo de 0 a $3,20 \mu\text{m}$) e a curva de irradiância de um corpo negro à temperatura de 5.900 K no topo da atmosfera.

Porém, a radiação eletromagnética ao atravessar a atmosfera poderá interagir com a mesma, sendo espalhada ou absorvida. Nesse caso, diz-se que a atmosfera é opaca, ou seja, não permite a passagem da radiação eletromagnética. Os principais componentes da atmosfera responsáveis por essas bandas de absorção são o oxigênio, o ozônio, o vapor d'água e o gás carbônico.

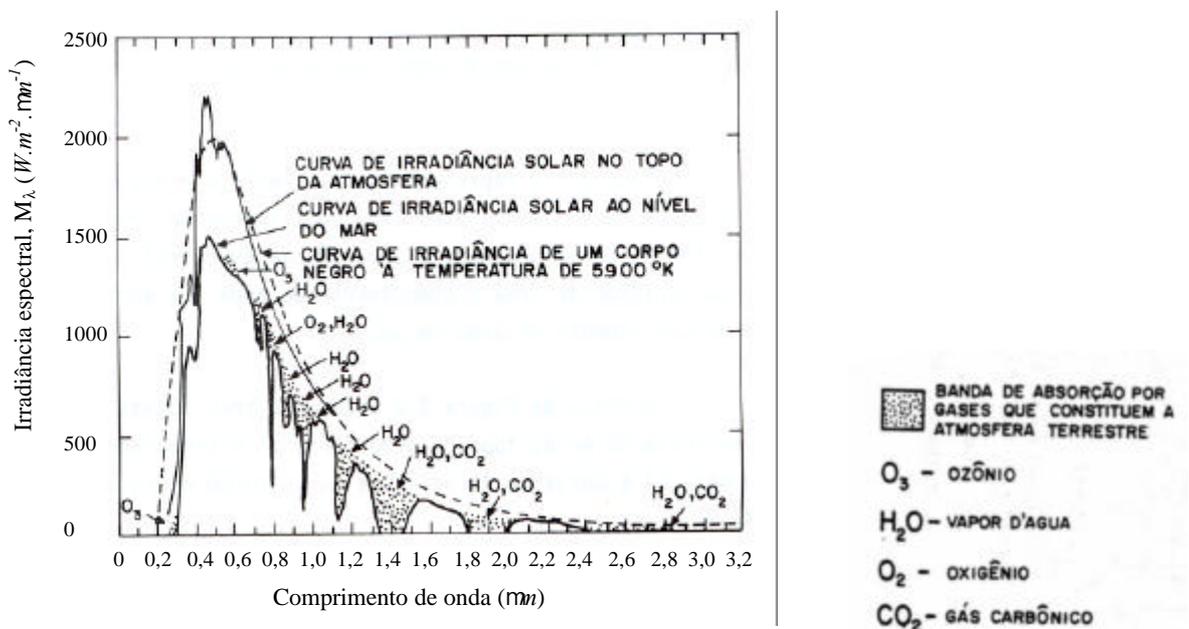


Figura 2.4 - Curvas de irradiância solar e de um corpo negro à temperatura de 5.900 K

Fonte: Novo (1992)

As respostas espectrais nos comprimentos de onda próximos a 1,45 e 1,95 μm são de especial interesse para os estudos de sensoriamento remoto de reflectância, pois estão centradas em feições de absorção da água. Porém, como a energia solar é atenuada, são pouco usuais em trabalhos de campo. Além desses comprimentos de onda, a região ultravioleta, até o comprimento de onda de 0,30 μm , também é impossível para uso em sensoriamento remoto por causa da absorção da radiação eletromagnética pelo ozônio.

As regiões do espectro eletromagnético em que a atmosfera é transparente, ou seja, em que ocorre a transmissão da radiação eletromagnética são conhecidas como janelas atmosféricas. Swain e Davis (1978) citam a localização das seis principais janelas atmosféricas compreendidas nos intervalos de 0,30 a 1,30 μm , 1,50 a 1,80 μm , 2,00 a 2,60 μm , 3,00 a 3,60 μm , 4,20 a 5,00 μm e 7,00 a 15,00 μm (figura 2.5).

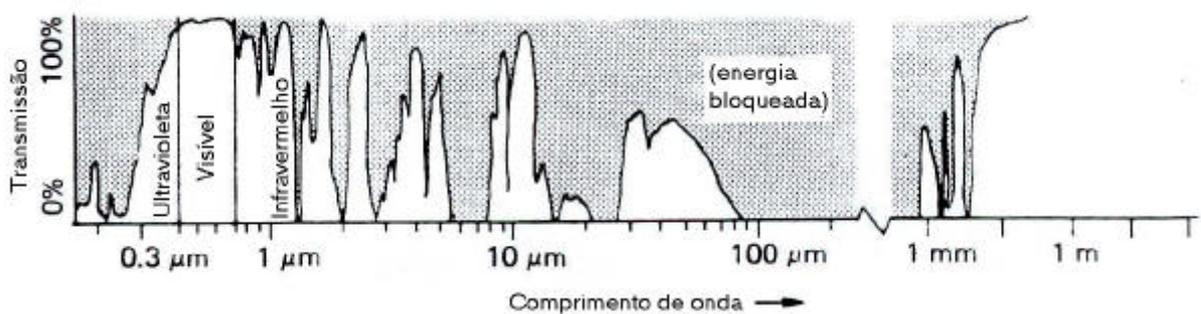


Figura 2.5 - Transmissão da radiação eletromagnética através da atmosfera
(comprimento de onda em escala logarítmica)

Fonte: Lillesand e Kiefer (1994)

A tabela 2.2 traz um resumo das principais regiões do espectro eletromagnético utilizadas para sensoriamento remoto. Além da coincidência com as janelas atmosféricas citadas anteriormente, há o pressuposto da existência efetiva de detectores nos intervalos. No caso da região de microondas, não foram feitas referências quanto a janelas atmosféricas porque não ocorre esse tipo de interferência na propagação da radiação eletromagnética nesses comprimentos de onda. Essa característica da região de microondas é considerada ímpar em sensoriamento remoto, pois permite obtenção de dados independentemente da cobertura de nuvens (Mattikalli *et al*, 1996).

Tabela 2.2 - Intervalos de comprimentos de onda utilizados em sensoriamento remoto, respectivas fontes de radiação e propriedades avaliadas

Intervalo	Comprimento de onda	Fonte de radiação	Propriedade da superfície de interesse
Visível	0,40 - 0,70 μm	Solar (passivo)	Reflectância
Infravermelho próximo	0,70 - 1,10 μm	Solar (passivo)	Reflectância
Infravermelho de ondas curtas	1,10 - 1,35 μm	Solar (passivo)	Reflectância
	1,40 - 1,80 μm		
	2,00 - 2,50 μm		
Infravermelho médio	3,00 - 4,00 μm	Solar, termal (passivo)	Reflectância, temperatura
	4,50 - 5,00 μm		
Infravermelho distante ou termal	8,00 - 9,50 μm	Termal (passivo)	Temperatura
	10,00 - 14,00 μm		
Microondas	1 mm - 1 m	Termal (passivo)	Temperatura (passivo)
		Artificial (ativo)	Rugosidade (ativo)

Fonte: Schowengerdt (1997)

2.1.5. A radiação eletromagnética e sua interação com os objetos da superfície

Pelo princípio da conservação da energia, um fluxo de radiação eletromagnética (f) ao interagir com um objeto poderá ser refletido, absorvido ou transmitido, portanto

$$f_{\text{incidente}} = f_{\text{refletido}} + f_{\text{absorvido}} + f_{\text{transmitido}} \quad (2.5)$$

normalizando em relação ao fluxo incidente, tem-se

$$1 = r + a + t \quad (2.6)$$

em que r é a reflectância (razão entre o fluxo refletido e o fluxo incidente em uma superfície), a é a absorvância (razão entre o fluxo absorvido e o fluxo incidente em uma superfície) e t é

a transmitância (razão entre o fluxo transmitido e o fluxo incidente em uma superfície). São adimensionais e variam entre 0 e 1.

A reflectância poderá ser do tipo especular, na qual quase toda a reflexão se dará em um ângulo igual ao ângulo da radiação incidente, ou difusa, em que ocorrerá um espalhamento da reflexão em diversas direções. A maioria das superfícies naturais tem comportamento intermediário entre os dois tipos.

No processo de transmissão, a radiação eletromagnética, ao atravessar uma interface com densidades distintas, será refratada, ou seja, seus raios sofrerão um desvio de direção acompanhado de alteração de velocidade. A mudança na velocidade é expressa pelo índice de refração, que relaciona a velocidade de propagação da radiação eletromagnética no vácuo e a velocidade de propagação no meio considerado (Born e Wolf, 1999), dado pela equação (2.7).

$$n = \frac{c}{u} \quad (2.7)$$

em que n é o índice de refração do meio considerado, c é a velocidade de propagação da luz no vácuo [m/s] e u é a velocidade de propagação da radiação no meio considerado [m/s].

A alteração do ângulo de refração em relação ao ângulo de incidência é explicada pela lei de Snell-Descartes, a qual estabelece que os raios incidente e refratado estão contidos no mesmo plano da normal à superfície e que as direções dos dois raios estão relacionadas pela equação (2.8). Por exemplo, a radiação eletromagnética ao atravessar a interface água / ar terá aumentado o ângulo do raio refratado em relação ao ângulo do raio incidente, porque o índice de refração da água é maior que do ar. Como consequência, o fluxo de energia emergente contido no ângulo sólido ($d\mathcal{W}$) é alterado pelo índice de refração (n), de tal modo que se espalha e passa a ocupar um ângulo sólido muito maior ($d\mathcal{W}.n^2$) (Novo, 2000), acarretando em uma diminuição da energia emergente detectada por unidade de ângulo sólido.

$$n_1 \cdot \text{sen } i = n_2 \cdot \text{sen } j \quad (2.8)$$

em que i e j são os ângulos dos raios incidente e refratado na superfície de interface entre os meios de propagação 1 e 2 e n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios de propagação 1 e 2.

Por sua vez, a absorção ocorrerá nos casos em que a superfície de incidência seja opaca à radiação eletromagnética em determinado comprimento de onda. A radiação

absorvida provoca alteração dos estados energéticos no nível atômico e molecular dos materiais constituintes do alvo, podendo acarretar aquecimento desses materiais, que, por sua vez, emitirão radiação eletromagnética em função da temperatura em que se encontrarem.

Nos sensores remotos que obtêm imagens nas bandas do visível ao infravermelho de ondas curtas, mede-se ou detecta-se apenas a parcela da radiação eletromagnética refletida, cuja intensidade e qualidade são função das propriedades espectrais que definem a absorbância e a transmitância do objeto, além de ser dependente das propriedades espaciais do objeto, como tamanho, forma, estrutura e textura de sua superfície (Meneses, 2000a).

A reflectância, como definida na equação (2.6), não considera a distribuição espacial dos fluxos de radiação refletido e incidente, sendo denominada de reflectância difusa. Em geral, os fluxos medidos na determinação da reflectância estão contidos em dois ângulos sólidos - W e W' (figura 2.6) e a razão entre esses fluxos é denominada reflectância bicônica da amostra. Exceção feita às superfícies lambertianas (a radiância é constante para qualquer ângulo de reflexão), o valor da reflectância bicônica varia com as direções dos fluxos incidente e refletido.

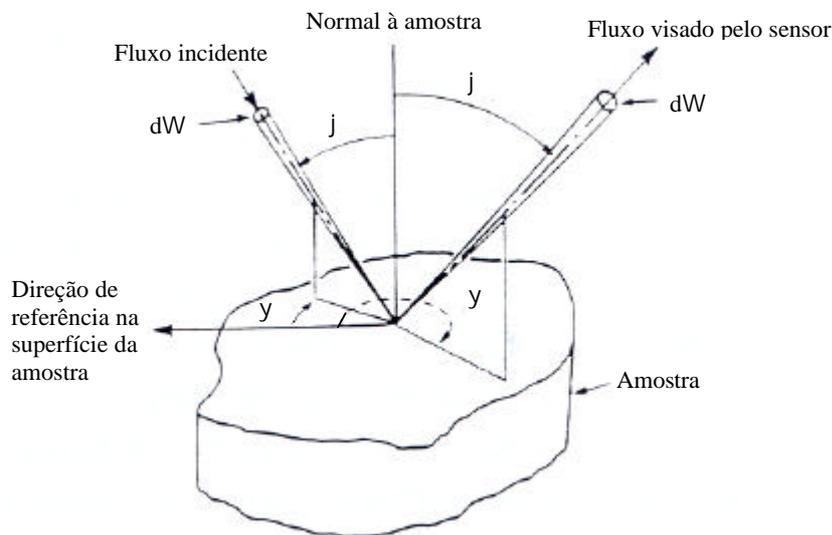


Figura 2.6 - Parâmetros geométricos que descrevem a reflexão de uma superfície (j é o ângulo zenital, y é o ângulo azimutal e W é o ângulo sólido)

Fonte: Baumgardner *et al.* (1985)

Quando os ângulos sólidos envolvidos na determinação da reflectância bicônica forem extremamente pequenos, a razão entre os fluxos pode ser denominada reflectância bidirecional da amostra e sua função de distribuição é dada por (Baumgardner *et al.*, 1985):

$$FDRB(j, y; j', y') = \frac{dL(j, y; E, j', y')}{dE(j, y)} \quad (2.9)$$

em que $FDRB$ é a função de distribuição de reflectância bidirecional [sr^{-1}], dL é a radiância [$W/(m^2 \cdot sr)$], dE é a irradiância [W/m^2], j é o ângulo zenital, W é o ângulo sólido [sr] e y é o ângulo azimutal.

Como não são comuns equipamentos para avaliação da reflectância originária de alvos não lambertianos, é praxe efetuar-se medidas de reflectância por meio do fator de reflectância bidirecional espectral (FRB), que é a razão entre as radiâncias espectrais da amostra e de uma superfície lambertiana ideal nas mesmas condições de iluminação e observação (Milton, 1987). Normalmente, utiliza-se como referência placas *spectralon* recobertas com sulfato de bário e óxido de magnésio, que por não serem lambertianas ideais, são calibradas com relação a um padrão de laboratório cuja reflectância espectral seja conhecida.

O comportamento espectral de um alvo é função das interações da radiação eletromagnética com o mesmo, as quais podem ocorrer em nível microscópico e macroscópico.

2.1.5.1. Interações microscópicas

De acordo com Meneses (2000a), a radiação eletromagnética é capaz de penetrar em apenas uma finíssima camada da superfície dos objetos, limitada aos primeiros 10 a 50 micrômetros de espessura. Essa espessura é suficiente para que a interação da radiação eletromagnética se faça ao nível microscópico com os elétrons ou moléculas do material e, por isso, está mais diretamente relacionada com a composição ou constituição dos materiais.

Nas medidas espectrais, as interações microscópicas são responsáveis por determinadas feições de absorção espectral da radiação, cujas características dependem do tipo de estrutura interna dos constituintes, do tamanho dos seus raios iônicos, das forças de

ligação, das impurezas iônicas contidas no material, etc. A água, por exemplo, possui feições características de absorção nas proximidades de 1,45 e 1,95 μm .

As interações microscópicas podem ser explicadas pelo modelo quântico, pois da comprovação de que os materiais se diferenciam entre si por constituírem sistemas com diferentes arranjos de níveis de energia, a reflectância seria uma resposta indireta das mudanças (ditas transições) ocorridas nesses níveis de energia, ao absorver parte da energia eletromagnética incidente. As transições ocorrem no nível eletrônico e no nível molecular (Meneses, 2000b).

2.1.5.2. Interações macroscópicas

Os principais fatores intervenientes no comportamento espectral do solo relativo a interações macroscópicas são as características físicas e de rugosidade da superfície (consideradas como lisas ou rugosas), a granulometria do solo, a forma das partículas e a geometria de iluminação.

A figura 2.7 exemplifica a reflexão da radiação eletromagnética em função da esfericidade e compactação dos grãos. Quanto maior for a compactação dos grãos, mais lisa a superfície se torna e, como consequência, mais refletora para a maioria dos materiais. Caso as partículas sejam mais esféricas e menos compactadas, haverá um maior número de superfícies expostas, acarretando em maior número de reflexões entre as várias superfícies dos grãos, que, além de provocar perdas de energia (por meio do processo de absorção), dificultará a saída dos raios, atenuando a radiação refletida (Meneses, 2000a).

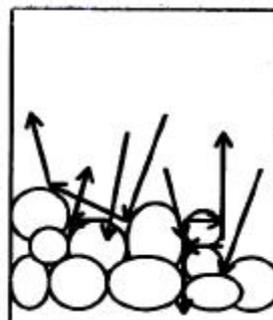


Figura 2.7 - Reflexões de raios de radiação eletromagnética entre as partículas em função da esfericidade e compactação dos grãos

Fonte: Meneses (2000a)

Com a superfície do solo úmida, acresce-se, ainda, a refração da radiação eletromagnética ao longo da película de água, que provocará diminuição na velocidade de propagação da energia eletromagnética e mudança do ângulo da energia transmitida para as partículas sólidas, acarretando em diminuição da parcela de energia refletida emergente da superfície solo.

2.2. FÍSICA DO SOLO

2.2.1. Umidade do solo

A umidade é a relação entre a fração de água contida em um solo e a fração sólida do mesmo. Pode ser dada em termos gravimétricos, em que as frações são referidas em massa, ou em termos volumétricos, em que as frações são referidas em volume e determinada em campo ou em laboratório.

O método mais comum para determinação da umidade em laboratório é o método gravimétrico, no qual a amostra é pesada na condição de estado úmida e após secagem em estufa (equação 2.17).

$$q_{grav} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{solo seco}}} \quad (2.17)$$

em que q_{grav} é a umidade gravimétrica (*adimensional*) e $m_{\text{água}}$ e $m_{\text{solo seco}}$ são as massas da água e do solo seco, respectivamente [kg].

Na tabela 2.3 são apresentadas algumas técnicas utilizadas para determinação da umidade do solo em campo. Trata-se de métodos indiretos, sendo que os equipamentos com menores custos possuem baixa acurácia, tais como blocos porosos e sensores de dissipação de calor e equipamentos com melhor acurácia possuem custos mais elevados, tais como TDR e sonda de nêutrons.

Tabela 2.3 - Métodos para determinação da umidade do solo *in situ*

Métodos	Considerações
Blocos porosos (gesso, <i>nylon</i>)	Afetado por salinidade
	Baixo custo
Sensor de dissipação de calor	Calibração necessária
	Baixa acurácia
Sonda de nêutrons	Sensível a variações na temperatura
	Exige o emprego de fonte radioativa
	Fontes de hidrogênio externas podem afetar as leituras
<i>Time domain reflectometry</i> (TDR)	Alta acurácia
	Não necessita de fonte radioativa

Fonte: adaptado de Charbeneau e Randall (1993)

2.2.2. Potencial mátrico

O movimento da água no solo depende do estado de energia em que se encontra, basicamente restrito à energia potencial (Hillel, 1998). Diferenças de potencial entre dois pontos indicarão uma tendência de movimento da água através dos poros do solo, no sentido do maior para o menor potencial. O potencial total (y_t) é composto principalmente pela soma dos potenciais gravitacional (y_g), osmótico (y_{os}) e mátrico (y_m), ou seja,

$$y_t = y_g + y_{os} + y_m \quad (2.19)$$

O potencial gravitacional representa o trabalho, contra ou a favor do campo gravitacional, necessário para levar a unidade de volume ou de peso de água da referência padrão até o ponto considerado. Geralmente, toma-se como referência padrão a superfície do solo.

Por sua vez, o potencial osmótico é a pressão hidrostática de equilíbrio quando ocorre o movimento da água de uma solução à outra, com concentrações iniciais distintas, através de

uma membrana semipermeável. Em solos não salinos, o potencial osmótico é considerado desprezível frente às demais parcelas do potencial total.

Já o potencial mátrico é a pressão de sucção na qual a água é mantida no solo. Esse potencial resulta das forças de capilaridade e adsorção.

A umidade do solo pode ser determinada indiretamente por meio da curva de retenção ou curva característica da água no solo (figura 2.8), que é a curva que relaciona umidade e potencial mátrico. A curva característica é dependente da textura e arranjo das partículas do solo. Porém, essa relação não é única, pois é afetada pela taxa de alteração da umidade e direção de mudança da mesma (drenagem ou umedecimento). Sua determinação é feita em laboratório por meio da drenagem crescente de uma amostra inicialmente saturada, ou do umedecimento gradual de uma amostra inicialmente seca. O conteúdo de água correspondente a uma dada pressão é maior na dessorção (drenagem) do que na sorção (umedecimento). Essa dependência em relação à direção do processo de determinação é denominada histerese, que é atribuída a diversas causas, incluindo a não-uniformidade geométrica dos poros, o preenchimento dos macroporos com ar (impedindo a ocupação por água) e o efeito do ângulo de contato entre a água e as paredes dos capilares (Hillel, 1998).

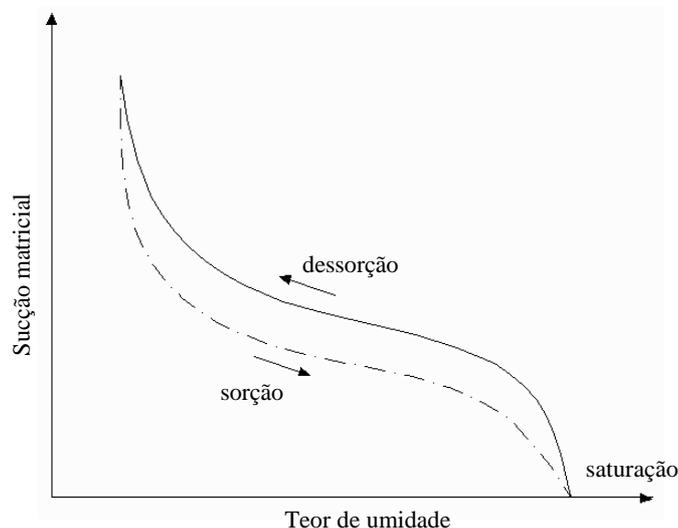


Figura 2.8 - Curva característica da água em um solo

Fonte: Hillel (1998)

Em campo, o potencial mátrico pode ser determinado por meio de tensiômetro, termopar psicrométrico, sensores de resistência elétrica, entre outros. Na tabela 2.4 são apresentadas algumas características desses métodos, sendo que o mais simples desses métodos é o tensiômetro, porém possui intervalo de funcionamento bastante restrito.

Tabela 2.4 - Métodos para determinação do potencial matricial *in situ*

Método	Intervalo de funcionamento (sucção)	Considerações
Tensiômetro	menor que 80 kPa	Determinação direta e precisa Baixo custo Manutenção necessária Sensível a variações na temperatura
Sensor de resistência elétrica	entre 50 e 1.500 kPa	Calibração necessária (com grande demanda de tempo) Baixo custo Afetado por salinidade
Termopar psicrométrico	entre 100 e 5.000 kPa	Calibração necessária (com grande demanda de tempo) Alto custo e complexo

Fonte: adaptado de Bruce e Luxmoore (1986)

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. COMPORTAMENTO ESPECTRAL DO SOLO

No processo de obtenção de informações sobre os recursos naturais da superfície terrestre, a partir de produtos de sensoriamento remoto, é necessário o conhecimento do comportamento espectral dos alvos, que é função das interações que ocorrerão entre o mesmo e a radiação eletromagnética. Essas interações se darão no nível microscópico e macroscópico.

O comportamento espectral dos solos, em termos de interações microscópicas, dependerá dos constituintes minerais, orgânicos e fluidos, que, combinados heterogeneamente, compõem os solos (Madeira, 2000). Quanto às interações macroscópicas, destacam-se a granulometria do solo, a forma das partículas, entre outras.

A avaliação dos espectros dos solos pode ser feita considerando vários atributos, sendo usual os seguintes (Valeriano *et al.*, 1995):

- albedo, que é o valor médio da reflectância medido a um dado intervalo de comprimentos de onda;
- feições de absorção, que correspondem às depressões ao longo das curvas de reflectância, sendo caracterizadas pela posição e largura. As feições de absorção, em termos de amplitude, podem ser suaves ou bem pronunciadas;
- formato, que pode ser definido pela aparência global da curva;
- detalhes nas regiões do visível e do infravermelho próximo, particularmente o formato, declividade e presença de pontos de inflexão. A importância do intervalo do visível se deve à sua estreita relação com a cor do solo. A presença (e intensidade) dos pontos de inflexão indica dominância de certas colorações na composição da cor, que, por sua vez, estão relacionadas com a mineralogia do solo.

Como os solos são materiais complexos, com diversos constituintes, a avaliação desses atributos se dará, principalmente, de forma relativa (considerando diferentes teores de cada constituinte). Por causa dessa característica de complexidade de composição do solo, Meneses (2000a) destaca alguns fatores intervenientes no comportamento espectral de solos:

- alguns constituintes presentes em menor proporção, em alguns materiais, podem dominar o comportamento da reflectância;
- a presença de substâncias ou compostos opacos, como a matéria orgânica contida nos solos em uma determinada porcentagem, não só reduz a reflectância total como pode mascarar as feições espectrais diagnósticas de outros componentes do material;
- algumas importantes feições espectrais típicas de alguns materiais, como, por exemplo, da água, podem aparecer modificadas nas imagens, devido às absorções da radiação pelos constituintes presentes na atmosfera (como ozônio, vapor d'água, gás carbônico, entre outros).

Diversas pesquisas já realizadas avaliaram a influência relativa de alguns parâmetros no comportamento espectral do solo, como conteúdo de matéria orgânica, teor de umidade do solo, granulometria, estrutura do solo, conteúdo de óxidos de ferro, mineralogia do solo, formação e composição do solo. Porém, como essas propriedades atuam simultaneamente na reflectância dos solos, nenhuma delas poderá ser analisada isoladamente.

Por exemplo, Epiphanyo e Formaggio (1982) citam que, dentre tais propriedades, a umidade e a matéria orgânica seriam as mais influentes modificadoras das respostas espectrais dos solos. Porém, Valeriano *et al.* (1995) ao avaliarem o fator de reflectância bidirecional de 14 tipos de solos brasileiros, no intervalo de 0,40 a 2,50 μm , ao considerarem o solo seco (na verdade com a umidade higroscópica) concluíram que a matéria orgânica e o conteúdo de ferro seriam os principais componentes presentes no solo a afetar o comportamento espectral, condicionando a presença de feições de absorção ao longo do infravermelho próximo.

Stoner e Baumgardner (1981) usaram o fator de reflectância bidirecional, entre 0,52 e 2,32 μm , para identificar diferentes tipos de solo. Distinguiram 5 tipos de curva com base nos critérios de formato da curva, presença ou ausência de bandas de absorção, presença / predominância de matéria orgânica e presença de óxidos de ferro (figura 3.1). Apesar de não terem considerado homogeneidade na textura e mineralogia desses solos, concluíram que

solos com curvas alteradas minimamente são caracterizados por baixos conteúdos de matéria orgânica e óxidos de ferro, além de possuírem boa drenagem.

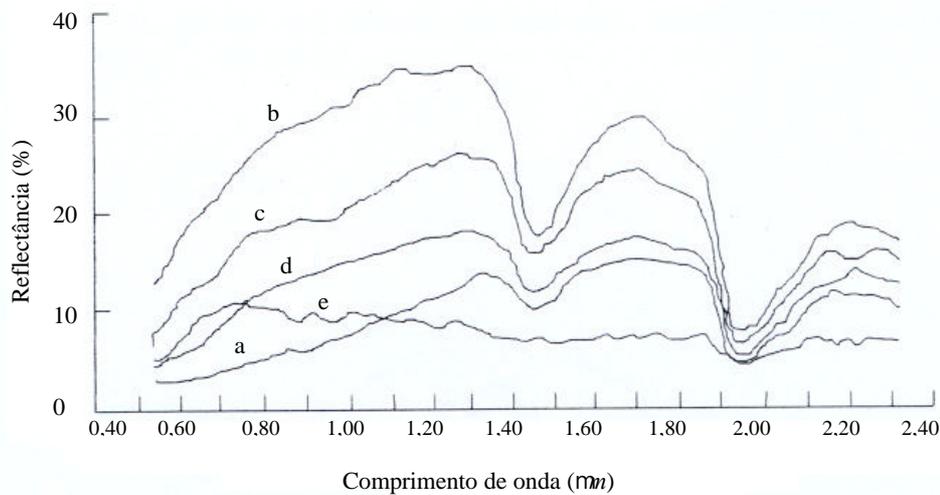


Figura 3.1 - Espectros de reflectância representativos de horizonte superficial de solos: (a) forma dominada pela matéria orgânica; (b) forma minimamente alterada; (c) forma afetada pelo ferro; (d) forma afetada pela matéria orgânica e (e) forma dominada pelo ferro

Fonte: adaptado de Stoner e Baumgardner (1981)

No entanto, Madeira Netto (1993) *apud* Madeira Netto (2000) mostrou que a curva referida por Stoner e Baumgardner (1981) como dominada pelo ferro está associada mais a solos que apresentam na sua constituição minerais opacos como a magnetita e a ilmenita, do que, necessariamente, teores elevados em óxidos de ferro. Em qualquer dos casos, a avaliação da presença de água, a partir da curva espectral, seria prejudicada nesse tipo de solo, uma vez que as feições de absorção da água nas proximidades de 1,45 e 1,95 μm são praticamente imperceptíveis.

Não há um consenso sobre quais propriedades, e em que intensidade, cada uma delas influencia o comportamento espectral dos solos. Porém, de uma maneira geral, os autores são unânimes em relatar a ocorrência da relação direta ou inversa entre essas características e o comportamento espectral, sendo demandada uma caracterização completa do solo a ser analisado e, caso haja, sua cobertura, para permitir uma avaliação comparativa com os resultados apresentados na literatura. Essa heterogeneidade de observações está associada tanto aos tipos de solos avaliados, condições de formação, arranjo das partículas e rugosidade da superfície, condições de iluminação, quanto às limitações metodológicas adotadas pelos

diversos autores a alguns parâmetros e limitações nos intervalos de funcionamento dos diferentes equipamentos empregados.

Nos tópicos que se seguem (3.1.1 a 3.1.5) são discutidas as influências, sobre o comportamento espectral no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas, de vários parâmetros e condições do solo, sempre que possível relacionando esse comportamento ao teor de umidade do solo.

3.1.1. Umidade do solo e comportamento espectral

3.1.1.1. Umidade superficial

Com o aumento da umidade superficial, o comportamento padrão dos solos úmidos é de reduzir, generalizadamente, a radiação refletida no intervalo espectral de 0,40 a 2,50 μm , ou seja, diminuição do albedo (Bowers e Hanks, 1965; Baumgardner *et al.*, 1985; Coleman e Montgomery, 1987), exemplificado na figura 3.2. Ångstron (1925) *apud* Madeira Netto (2000) comenta que esse comportamento é devido às reflexões internas da radiação eletromagnética na camada de água que cobre as partículas sólidas e que fazem com que uma parte dessa energia não seja refletida para o exterior, mas para o interior do solo.

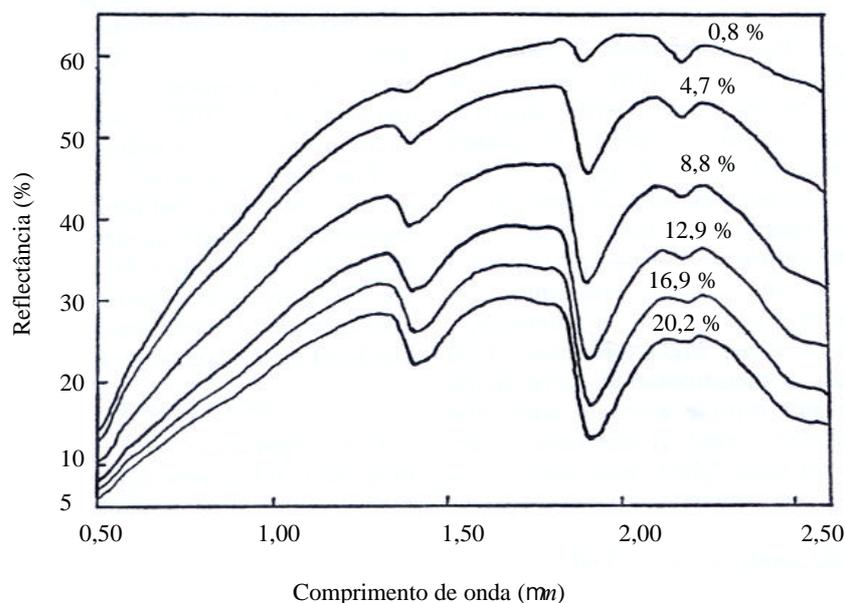


Figura 3.2 - Comportamento espectral de uma argila siltosa em função do conteúdo de umidade

Fonte: adaptado de Bowers e Hanks (1965)

Portanto, a reflectância está inversamente relacionada com o conteúdo de umidade do solo. Especificamente na região do visível ao infravermelho próximo, Courault *et al.* (1993) e Muller e Décamps (2000) observaram que essa relação não é linear, mas aproximadamente uma curva exponencial.

Além disso, o efeito de redução na radiação refletida após a adição de água a amostras de solos tem se mostrado dependente da cor do solo (Epiphanyo *et al.*, 1992).

Acrescendo-se à redução generalizada do albedo, a presença da água no solo é evidenciada pelas feições de absorção bem definidas nas proximidades de 1,45 e 1,95 μm . Essas feições são devidas a processos vibracionais moleculares, que resultam de mudanças energéticas do estado estacionário de vibração das ligações das moléculas (Bowers e Hanks, 1965).

Porém, como comentado, as regiões nas proximidades dos comprimentos de onda de 1,45 e 1,95 μm só são adequadas para estudos em laboratório com condições de umidade relativa do ar controlada, preferencialmente nula, do contrário ocorrerão bandas de absorção pelo vapor d'água e outros constituintes da atmosfera, portanto causando interferências em trabalhos desenvolvidos nessas condições.

Alguns autores, como Formaggio *et al.* (1996) e Baumgardner *et al.* (1985), ao avaliarem as alterações provocadas pela água no comportamento espectral do solo, observaram a possibilidade da ocorrência de feições de absorção fracas em 0,97, 1,20 e 1,77 μm . Além da água, a presença de outros componentes no solo poderá provocar feições de absorção, como os grupos hidroxila (OH), com feições de absorção em 1,45 μm . Portanto, uma feição de absorção em 1,45 μm e a ausência em 1,95 μm indicará a presença de grupos hidroxila e não de água (feições de absorção simultâneas em 1,45 e 1,95 μm).

Há uma diversidade de estudos desenvolvidos na tentativa de avaliar a correlação entre o teor de umidade e as alterações na reflectância dos solos, quer sejam considerando valores espectrais relativos a alguns comprimentos de onda ou médias de reflectância correspondentes a faixas de comprimentos de onda.

Price *et al.* (1990) *apud* Price e Gaultney (1993) apresentaram os comprimentos de onda de 0,75, 0,81, 0,84 e 0,94 μm , dentro do intervalo considerado de 0,50 a 1,00 μm , como significantes para avaliação da umidade no solo. Já Beck *et al.* (1976) sugeriram o intervalo

de 1,50 a 1,73 μm como a melhor região para mapeamento do conteúdo de umidade no solo, dada a impraticabilidade, em estudos de campo, do emprego de comprimentos de onda mais próximos a 1,95 μm . Courault *et al.* (1993), por sua vez, observaram o maior decréscimo de reflectância (entre 10 e 20%), comparando um solo com teor de umidade de 10,6 % e 28,8 %, em uma banda do infravermelho próximo (0,79 a 0,90). Além dessa banda, esse estudo se restringiu a duas outras bandas do visível (0,50 a 0,59 e 0,60 a 0,69 μm).

De outra parte, as estimativas obtidas por Stoner *et al.* (1980a) e Coleman e Montgomery (1987) indicaram o infravermelho de ondas curtas (2,08 a 2,35 μm) como o intervalo de maior importância para estudo de umidade, sendo que estes obtiveram um coeficiente de determinação de 0,80. Já Gonçalves (1999), considerando as faixas compreendidas, aproximadamente, nos intervalos de 0,40 a 0,90 μm , 1,00 a 1,39 μm , 1,47 a 1,79 μm e 2,01 a 2,40 μm , obteve coeficientes de determinação de até 0,97, superiores aos obtidos por aqueles autores, exceto no intervalo do visível (0,40 a 0,90 μm) com coeficiente de determinação de aproximadamente 0,80.

Esses tipos de trabalhos são empregados na calibração de modelos utilizando dados obtidos por satélites para estimativa de umidade. Gonçalves (1999), por exemplo, correlacionou dados de reflectância, em nível de campo, em intervalos equivalentes às bandas TM 3, TM 4, TM 5 e TM 7 do Landsat-5 com seus respectivos dados de umidade, sem contudo, correlacioná-los a dados orbitais. Para tanto, empregou um modelo logarítmico, obtendo coeficientes de determinação compreendidos entre 0,62 e 0,69 nos intervalos correspondentes a essas bandas.

A estimativa de umidade a partir de dados de sensores orbitais, usando equações experimentais, possibilita a construção de mapas temáticos delimitando espacialmente diferentes teores de umidade potencial disponíveis, como empregado por Mattikalli *et al.* (1996).

3.1.1.2. Umidade no perfil

Alguns autores, como Muller e Décamps (2000) comentam que a penetração da radiação eletromagnética no solo no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas se restringe a uma profundidade com ordem de grandeza de micrômetros ou menos. Meneses

(2000a) cita ser essa profundidade restrita aos primeiros 10 a 50 micrômetros de espessura. Apesar disso, alguns autores avaliaram a correlação existente entre comportamento espectral e umidade no perfil do solo, em condições de campo, considerando profundidades de até 50 cm, como Idso *et al.* (1975), Epiphonio e Formaggio (1982) e Hatanaka *et al.* (1995), sendo os trabalhos desenvolvidos em solos americanos, brasileiros (Brasília) e japoneses, respectivamente.

Idso *et al.* (1975), apesar de não quantificarem, concluíram que o albedo era uma função linear da umidade do solo em uma camada de 0,2 cm e que havia uma boa correlação entre o albedo e a umidade do solo na camada de até 10 cm.

Por sua vez, Epiphonio e Formaggio (1982) analisaram a relação entre umidade no perfil de um latossolo vermelho-escuro, considerando as profundidades de 2, 3, 10, 20 e 30 cm, e a reflectância em 8 comprimentos de onda entre 0,45 e 1,05 μm , concluindo que as correlações com os dados de umidade no perfil eram similares às obtidas para umidade na superfície, ou seja, quanto maior o teor de umidade do solo, menor a sua reflectância, com coeficiente de determinação de 0,75. Relatam, ainda, que, para as diversas profundidades, não houve uma diferença sensível nos coeficientes de determinação, possivelmente pelo fato de que para o solo estudado a perda de umidade se desse de maneira uniforme entre as camadas subsuperficiais, de modo que a reflectância representativa da camada mais superficial fosse também representativa das camadas subsuperficiais. Porém, talvez os altos coeficientes de determinação obtidos estivessem mais relacionados a essa característica de uniformidade do solo, que, propriamente, à interação da energia eletromagnética incidente sobre a superfície com os conteúdos de umidade nas profundidades avaliadas, já que a metodologia aplicada não permitia variação de umidade no perfil sem que acarretasse mudanças no teor de umidade superficial, que ao variar produzia mudanças na reflectância, como as observadas por Bowers e Hanks (1965).

De outra maneira, Hatanaka *et al.* (1995) correlacionaram a umidade no perfil de solos japoneses, estimada a partir das curvas características dos solos estudados, considerando as camadas compreendidas pelas profundidades de 0 a 15 cm, 0 a 30 cm e 0 a 50 cm, com bandas artificiais geradas pela operação de subtração entre os níveis digitais de cada banda do sensor TM (LANDSAT 5) de uma imagem coletada com o solo apresentando baixos conteúdos de umidade e de outra imagem coletada com o solo apresentando conteúdos de umidade mais elevados. O melhor resultado foi observado com a banda artificial resultante da

diferença entre as bandas TM 5 das duas imagens (coeficiente de determinação entre 0,78 e 0,93). Verificaram, ainda, que a acurácia da estimativa, em alguns solos, diminuía com o aumento da profundidade, fato que os autores associaram à alteração da granulometria no perfil (presença de uma camada de cascalho a partir da profundidade de 30 cm). Como em Epiphany e Formaggio (1982), além da homogeneidade do solo (até a profundidade de 30 cm), os teores de umidade superficial eram distintos, o que não permitiria inferir, de imediato, que a resposta espectral detectada pelo sensor TM fosse função da umidade nas profundidades consideradas.

3.1.2. Teor de matéria orgânica

A influência da matéria orgânica sobre o comportamento espectral do solo é função da quantidade presente e de sua composição.

A depender das condições de desenvolvimento da matéria orgânica (como, por exemplo, o clima), a mesma poderá diferir em seus compostos, principalmente nos conteúdos de ácidos húmicos e fúlvicos, provocando distintos impactos sobre o comportamento espectral do solo, podendo, inclusive, aumentar a reflectância, mesmo com teores de matéria orgânica semelhante (Demattê e Garcia, 1999 e Henderson *et al.*, 1992).

É consenso na literatura que os solos de climas mais úmidos geralmente refletem menos do que aqueles de climas secos devido ao maior acúmulo de matéria orgânica nos primeiros.

Baumgardner *et al.* (1970) *apud* Baumgardner *et al.* (1985) inferiram que a quantidade necessária de matéria orgânica para mascaramento de outras propriedades no comportamento do solo é de 2,0 %, sendo que, em taxas inferiores, a eficácia é menor. Por sua vez, Galvão e Vitorello (1998) estabeleceram um limiar menor ao concluir que a presença de teor de matéria orgânica superior a 1,7 % mascara as feições espectrais do ferro e induz a uma redução maior que 40% na correlação negativa entre conteúdo de ferro total e reflectância.

No que se refere às regiões de interferência, como a matéria orgânica altera a cor do solo, a sua presença provoca rebaixamento no espectro ao longo do visível, como constatado por Galvão e Vitorello (1998), que relatam ser a matéria orgânica o principal composto responsável, entre os analisados (sílica, ferro total, óxido de alumínio, óxido de titânio e

matéria orgânica), pelo rebaixamento da reflectância nesse intervalo, especialmente entre 0,55 e 0,70 μm . Já, Coleman e Montgomery (1987) verificaram que a região do infravermelho próximo (0,76 a 0,90 μm) estava correlacionada com as variações da matéria orgânica em 58 % dos casos analisados.

Outros estudos propuseram intervalos mais amplos, como, por exemplo, Mathews *et al.* (1973), os quais concluíram que a matéria orgânica, juntamente com óxidos de ferro, influencia mais determinadamente no intervalo entre 0,50 e 1,20 μm . Por sua vez, Demattê e Garcia (1999) relataram que a matéria orgânica interferia na intensidade da reflectância, comparativamente a outro solo, em um intervalo mais amplo entre 0,40 e 1,30 μm .

3.1.3. Composição mineralógica

Os componentes do solo presentes em menor proporção podem dominar o comportamento espectral do mesmo. Portanto, é imprescindível a determinação da composição mineralógica de um solo, especialmente no controle da variação espacial dessa composição em trabalhos de campo. A identificação de minerais na fração argila pode ser feita empregando difratogramia de raios-X (Bedidi *et al.*, 1992; Houssa *et al.*, 1996 e Demattê e Garcia, 1999).

Apesar das sobreposições de efeitos devido à composição e condições de umidade, como alguns minerais apresentam feições de absorção típicas, a espectrorradiometria é utilizada na detecção da presença desses minerais no solo.

Os minerais de ferro e titânio, em especial a magnetita e ilmenita, podem ser opacos, provocando uma redução na reflectância nos intervalos do espectro visível ao infravermelho de ondas curtas (Demattê e Garcia, 1999). Por sua vez, a presença de quartzo acarreta aumento da reflectância. Já a presença de caulinita no solo provoca feições de absorção típicas nos intervalos de 1,40 a 1,41 μm e 2,16 a 2,20 μm (Hunt e Salisbury, 1970 *apud* Galvão *et al.*, 1997).

Formaggio *et al.* (1996) confirmaram tal assertiva sobre a magnetita e ilmenita ao verificarem o mascaramento de feições características, como as feições de absorção da água,

nas curvas espectrais de latossolo roxo que apresentaram albedo baixo, na região do visível ao infravermelho de ondas curtas, devido à presença de tais minerais.

As relações observadas entre os óxidos de ferro e o comportamento espectral estão associadas à presença ou não de matéria orgânica, devido ao potencial da mesma de reduzir a reflectância do solo.

Além disso, o teor de umidade do solo também deverá ser analisado concomitantemente, pois a água, além de afetar o comportamento espectral *per si*, é determinante no processo de formação dos solos na medida em que propicia transporte de compostos e integra ou viabiliza determinadas reações químicas, inclusive alterando a cor do mesmo. Em especial, a cor do solo concorre com uma noção sobre o regime hidrológico ou condições de drenagem a que o mesmo esteja submetido, devido a mudanças na coloração de minerais de ferro dependendo do estado de oxidação e redução em que se encontrem (Mattikalli, 1997). Stoner *et al.* (1991) comentam que latossolos bem drenados com lençol freático abaixo de 3 m de profundidade apresentam matizes avermelhados, indicando ambiente de oxidação com mineralogia de hematita e goetita (goetita e hematita são os minerais de ferro resultante da oxidação de ferro presente como Fe^{+2} nos minerais primários no processo de formação do solo). Por outro lado, a superfície do solo em locais com lençol freático sazonalmente alto tem matizes amarelados com predominância de goetita. A cor se relaciona mais ao tipo de óxido de ferro presente do que ao teor, sendo que a goetita na ausência da hematita se revela com cores amareladas. O efeito tingidor de certos óxidos de ferro, como hematita, é evidente mesmo em pequenas quantidades, podendo mascarar até o efeito da matéria orgânica.

No entanto, essas relações de mascaramento dependem da matéria orgânica, dos compostos de ferro avaliados e das respectivas proporções. Galvão e Vitorello (1998), por exemplo, concluíram que a remoção de matéria orgânica (presente na proporção de 1,7 %) favoreceu o surgimento de uma forte relação entre reflectância e ferro total no visível e a evidenciação de uma forte banda de absorção próximo a 0,90 μm no espectro do solo, em concordância com uma das bandas de absorção do ferro (0,70 e 0,90 μm) apontadas por Stoner *et al.* (1980a). Isso porque, com a remoção da matéria orgânica, o principal condicionante de absorção da radiação passou a ser o ferro, já que, como evidenciado por Stoner e Baumgardner (1981) - ilustrado na figura 3.1 (a), (c) e (e) apresentada no item 3.1. -

a matéria orgânica em determinados teores pode não só mascarar os conteúdos de ferro, mas também outros compostos do solo e suas respectivas feições de absorção.

Coleman e Montgomery (1987), além de avaliar os intervalos espectrais explicativos para estimativa do teor de umidade e matéria orgânica, observaram que o vermelho (0,63 a 0,69 μm) e uma faixa do infravermelho de ondas curtas (1,15 a 1,30 μm) estão correlacionados com as variações devido à presença de óxidos de ferro (com coeficiente de determinação de 0,62).

Por sua vez, Stoner (1979) *apud* Baumgardner *et al.* (1985) observou uma alta correlação entre a reflectância e o conteúdo de óxidos de ferro no infravermelho de ondas curtas de 1,55 a 2,32 μm .

3.1.4. Textura / granulometria e rugosidade da superfície

Quanto à rugosidade, as superfícies podem ser classificadas em lisas ou rugosas. Diversos autores empregam a relação de Rayleigh para distinção dessas superfícies, que é dependente do comprimento de onda e ângulo de incidência da radiação eletromagnética,

$$\frac{l}{8 \cdot \cos j} \tag{3.1}$$

se equação (3.1) $> h$, a superfície é rugosa

se equação (3.1) $< h$, a superfície é lisa

em que h é a variação da altura do microrelevo, j é o ângulo da radiação incidente com a normal à superfície do alvo e l é o comprimento de onda.

Sendo a superfície lisa, ocorrerá reflectância do tipo especular (quase toda a reflexão se dará em um ângulo igual ao ângulo da radiação incidente). No caso da superfície rugosa, ocorrerá a reflectância difusa (espalhamento da reflexão em diversas direções), conforme exemplificado na figura 3.3.

A textura se refere à distribuição das partículas, tão somente, quanto ao seu tamanho. Tradicionalmente, as frações texturais são divididas em argila, silte e areia. O termo textura tem sido utilizado como sinônimo de granulometria do solo.

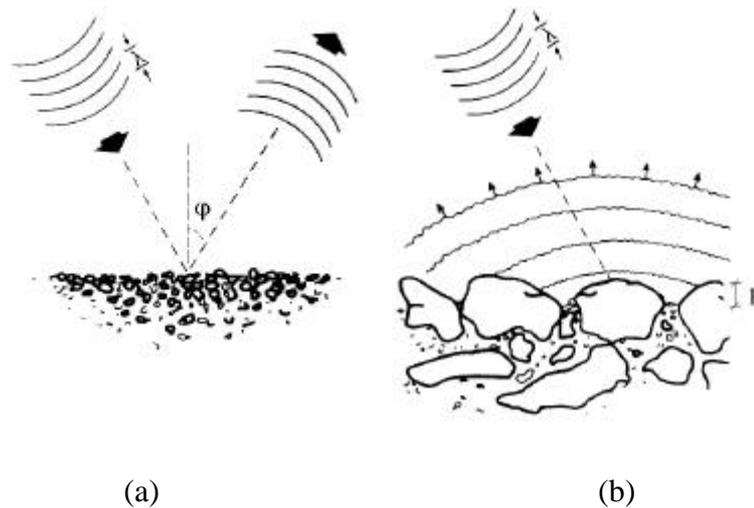


Figura 3.3 - Exemplos de reflectância (a) especular e (b) difusa

Fonte: adaptado de Avery e Berlin (1992)

Comparativamente às superfícies com texturas mais grosseiras, as superfícies com texturas mais finas apresentam reflectâncias maiores, uma vez que com a diminuição do tamanho das partículas diminuem-se também os espaços vazios para interação da radiação eletromagnética. Esse fato foi evidenciado por Bowers e Hanks (1965), os quais observaram que o decréscimo no tamanho das partículas, em estudo limitado a frações minerais entre 0,02 e 2,68 mm, provoca um crescimento exponencial na reflectância em todos os comprimentos de onda entre 0,40 e 1,00 μm . Como a rugosidade de uma superfície é função do tamanho das partículas, a alteração da rugosidade acarreta em impacto similar.

Além disso, Cierniewski (1987) argumenta que a penetração da radiação eletromagnética no solo é pequena e, portanto, distúrbios na camada superficial ou na rugosidade do solo modificariam sua reflectância.

3.1.5. Cobertura vegetal

A cobertura vegetal pode mascarar significativamente e alterar a resposta espectral de um solo. O grau de interferência depende do tipo e quantidade de vegetação e da resposta espectral do solo. Materiais com baixo albedo tendem a ser mais afetados. Já a vegetação morta ou seca não altera significativamente o formato da curva espectral, porém contribui para diminuição do albedo em comprimentos de ondas menores, no intervalo de 0,68 a 1,30 μm . A baixa reflectância da vegetação verde em comprimentos de onda superiores a 1,40 μm (figura 3.4) induz a perspectiva de conter maior informação espectral do solo para uma dada porcentagem de cobertura em relação a comprimentos de onda menores (Siegal e Goetz, 1977).

Siegal e Goetz (1977) observaram que coberturas vegetais que ocupem frações superiores a 30 % da superfície afetam a curva espectral da maioria dos solos, porém, em alguns, a interferência é insuficiente para anular a banda de absorção do ferro e a banda de absorção devido à hidroxila, em 2,20 μm , ainda é distinguível. Ganneau (1975) *apud* Baumgardner *et al.* (1985), por sua vez, reportou que coberturas de vegetação inferiores a 15% não aparecem na resposta espectral de um solo, porém em presença superior a 40%, o comportamento espectral se assemelha completamente à vegetação.

Nas pesquisas envolvendo a avaliação exclusivamente da umidade do solo deve-se escolher apropriadamente uma superfície com o máximo possível de solo exposto (Muller e Décamps, 2000). Porém, como o estresse hídrico está relacionado com o teor de umidade do solo e a reflectância da vegetação é alterada pelo estresse hídrico a que esteja submetida, especialmente no intervalo do infravermelho de ondas curtas (1,30 a 2,50 μm), onde as relações entre o conteúdo de água na folha e a resposta espectral estão diretamente relacionadas (figura 3.4), alguns autores correlacionaram a resposta espectral de diferentes tipos de vegetação submetida a estresse hídrico com o teor de umidade no solo, como Senay *et al.* (2000) e Gonçalves (1999). Este avaliou a relação existente entre comportamento espectral de gramínea obtido em condições de campo e o teor de umidade do solo diretamente abaixo da vegetação (sem referências quanto à profundidade), tendo obtido coeficientes de determinação superiores a 0,67. Enquanto que aqueles correlacionaram o comportamento espectral de vegetações, o conteúdo de água nas folhas de algumas culturas (soja e milho) e o teor de umidade no solo, até uma profundidade de 5 cm, obtendo bons coeficientes de correlação entre os três dados somente para uma profundidade de no máximo 2 cm.

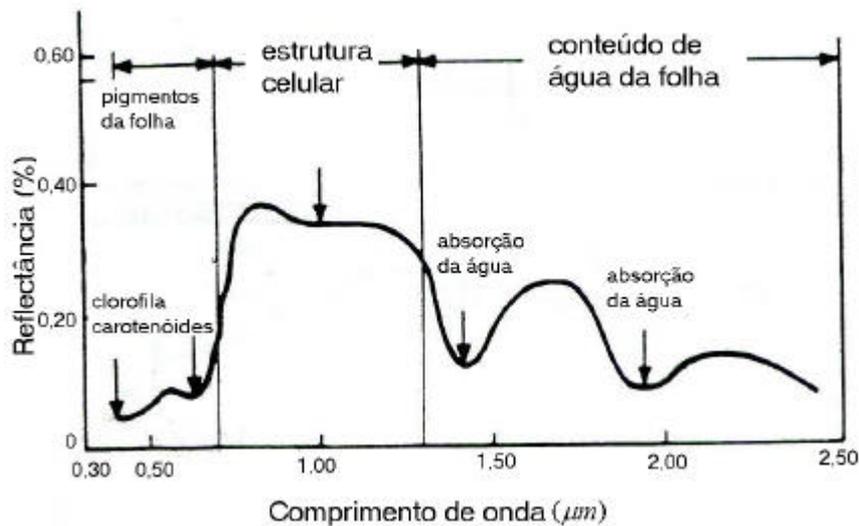


Figura 3.4 - Curva média do comportamento espectral da vegetação fotossinteticamente ativa
 Fonte: Bowker *et al.* (1985) *apud* Novo (1992)

Apesar de Senay *et al.* (2000) não comentarem sobre a ocorrência de precipitações nas proximidades das datas em que se efetivaram os trabalhos de campo, não permitindo comentários sobre as condições de umidade do solo frente aos processos de infiltração ou ascensão da franja capilar, os mesmos correlacionaram a biomassa úmida das vegetações analisadas com o conteúdo de água na planta, com coeficiente de correlação de 0,99, e, por sua vez, como a água do solo tende a estar correlacionada positivamente com a biomassa dessas vegetações ao longo do período de crescimento (baixos e altos conteúdos de água correspondem a baixos e altos períodos de crescimento da biomassa), efetivamente seria esperada uma correlação entre umidade do solo e resposta espectral da vegetação.

Quanto ao trabalho realizado por Gonçalves (1999), não se pode inferir sobre a coerência ou não da correlação estimada, já que a metodologia adotada não prescrevia a observação do estresse da mesma por meio do conteúdo de água das folhas, até porque esse tipo de cobertura mantém teores de umidade altos no solo por um período de tempo relativamente grande. Além disso, como plantações do tipo gramíneas recobriam todo solo, o comportamento espectral, provavelmente, manteve-se associado completamente à vegetação, sem que se avaliassem os conteúdos de água presentes nas folhas e sua relação com o teor de umidade do solo.

3.2. ESPECTRORRADIOMETRIA DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

Diversos trabalhos já foram realizados para análise do comportamento espectral de solos (Valeriano *et al.*, 1995; Baumgardner *et al.*, 1985 e Epiphany e Formaggio, 1982). Apesar de existir um volume considerável de trabalhos realizados em campo (Houssa *et al.*, 1996; Coleman e Montgomery, 1987), por muito tempo predominaram as análises de laboratório (Galvão e Vitorello, 1998; Valeriano *et al.*, 1995 e Bowers e Hanks, 1965).

Os trabalhos de campo são imprescindíveis para constatação das propriedades de reflectância do solo sujeitas às variações na cobertura vegetal, nos sombreamentos, na rugosidade da superfície e na geometria de iluminação, uma vez que a superfície do solo pode ser irradiada pela luz solar diretamente, pela luz espalhada na atmosfera e pela radiação termal da vizinhança (Baumgardner *et al.*, 1985). Além disso, a espectrorradiometria de campo é necessária à obtenção de estimativas e simulação do comportamento espectral do solo em suas condições naturais captado por sensores em nível orbital ou em nível de aeronave, acrescidas das devidas considerações sobre os efeitos atmosféricos.

Porém, como os fatores intervenientes nos trabalhos de campo são agravados, em relação aos experimentos de laboratório, pela interferência atmosférica, anisotropia de características do solo, mudanças na rugosidade da superfície, entre outras, ainda que necessários, a adoção dos mesmos pressupõe um conhecimento prévio do comportamento esperado adquirido em laboratório, ou seja, um modelo ideal, ainda que sobre amostras de solos deformadas. Em laboratório, pode-se controlar melhor esses fatores.

O emprego de espectrorradiometria em condições controladas desenvolvidas em laboratório é importante para estudo das propriedades espectrais de um grande número de solos de diversas regiões geográficas, com climas distintos, sem a necessidade de transportar um espectrorradiômetro. Stoner *et al.* (1980b) verificaram a validade da comparação de medidas do comportamento espectral de solos úmidos sob condições controladas de laboratório sob tensão matricial de 10 kPa e em condições de campo, obtendo como resultado reflectância de campo 50% superior à de laboratório no intervalo de 0,52 a 1,75 μm .

É necessário um campo de visada largo o suficiente para permitir representar a heterogeneidade de uma superfície por meio de espectrorradiometria. No entanto, caso esse

ângulo seja excessivo, será difícil caracterizá-lo como sendo zenital. Baumgardner *et al.* (1985) sugeriram como sendo apropriado para condições de campo um ângulo de 15°. Já para laboratório, que possui controle sobre a rugosidade da superfície, sugeriram um ângulo de 1°. Além disso, na adoção de um ângulo de visada, é necessário avaliar o quanto características da superfície medida, quer sejam texturais (podem provocar anisotropia), condições de contorno (interferência das bordas de recipientes utilizados em laboratório) ou de homogeneidade / heterogeneidade de composição do solo, podem afetar a leitura a ser realizada.

4. METODOLOGIA DO TRABALHO E PROCEDIMENTOS

Na consecução dos objetivos propostos, dadas as dificuldades associadas ao isolamento de uma parcela de solo em campo para verificação da hipótese, a etapa principal foi desenvolvida em laboratório, tendo como fonte de iluminação uma lâmpada, sem contudo haver controle de temperatura e umidade relativa do ar. Utilizou-se na coleta de dados de reflectância o espectrorradiômetro GER 2600.

Na figura 4.1 é apresentado o esquema ilustrativo das etapas realizadas.

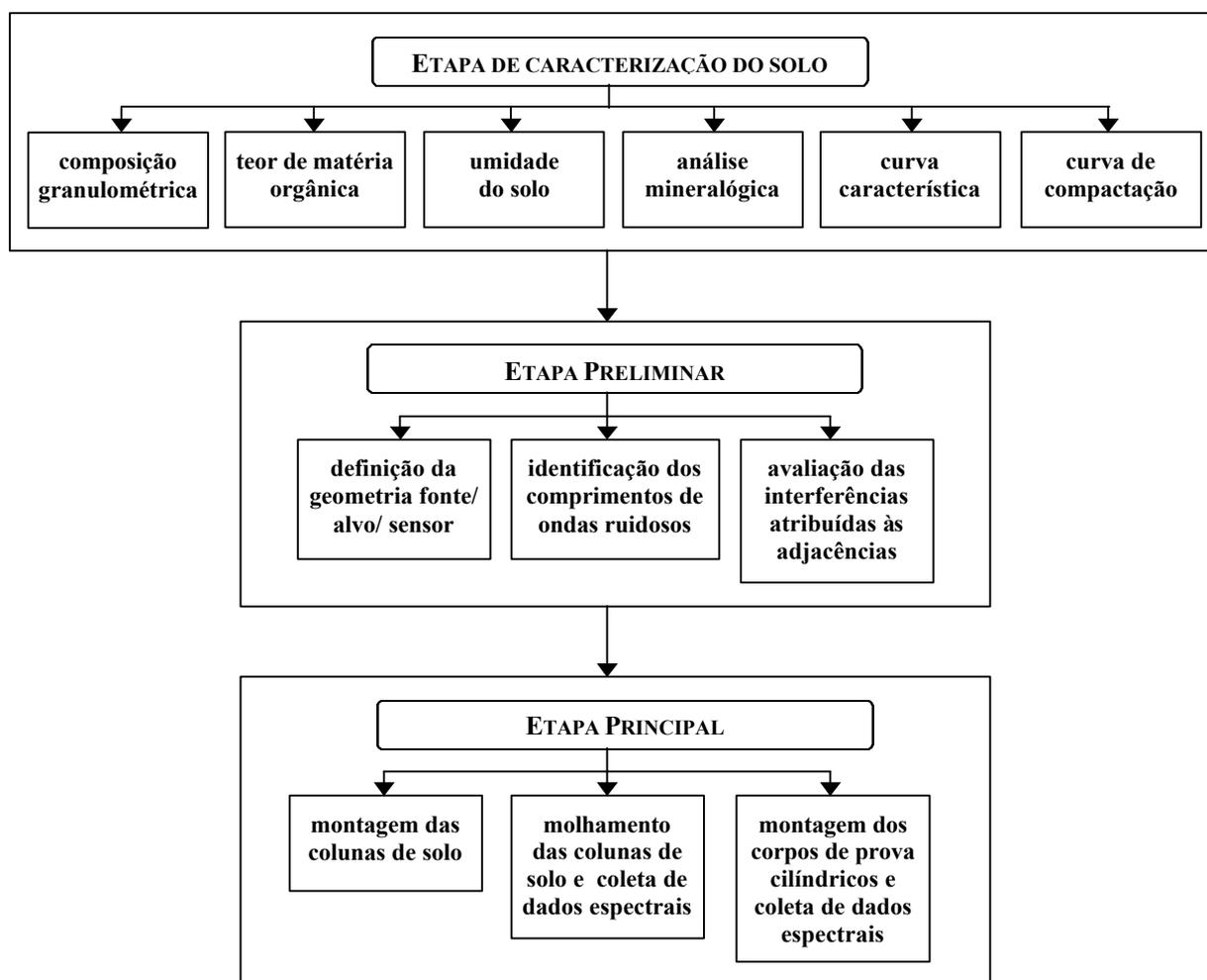


Figura 4.1 - Esquema ilustrativo das etapas do trabalho

Na primeira etapa ou etapa de caracterização do solo foram determinados a granulometria, o teor de matéria orgânica, a composição mineralógica, a curva característica e

a curva de compactação. Além disso, realizou-se um teste para definição da temperatura ideal para secagem do solo.

Na segunda etapa ou etapa de testes preliminares, devido à necessidade de adoção de alguns procedimentos experimentais e avaliação de alguns fatores intervenientes, tais como a aplicabilidade da lâmpada como fonte de radiação eletromagnética, definição do ângulo entre a lâmpada e a superfície visada (geometria fonte-alvo-sensor), avaliação de comprimentos de onda ruidosos nos espectros, avaliação das interferências atribuídas às adjacências, entre outros, foram coletados e avaliados dados de reflectância tendo como alvos a placa de referência e os corpos de prova cilíndricos de solo compactados em tubos de PVC com diâmetro e altura correspondentes a 100 mm.

A terceira etapa ou etapa principal foi executada no Laboratório de Hidráulica da UnB, onde foram montadas duas colunas de solo com dimensões de 0,30 x 0,30 m e altura de 1,50 m com latossolo vermelho-escuro compactado de maneira a atingir uma massa específica aparente de $1,20 \text{ g/cm}^3$, aproximando-se da massa específica aparente encontrada no solo *in situ*. Nessas colunas, o solo foi umedecido no sentido das camadas inferiores para as camadas superiores. À medida que a frente úmida ascendia no solo, utilizando-se de uma lâmpada halógena com potência de 1.000 W como fonte de radiação, coletaram-se dados de reflectância no intervalo de 0,40 a 2,50 μm . Previam-se que o acompanhamento da frente úmida se desse por meio da obtenção do potencial matricial do solo, uma vez que, o único equipamento disponível era o tensiômetro de vácuo. Para tanto, os mesmos foram instalados ao longo dos primeiros 50 cm da coluna de solo. No entanto, os tensiômetros não chegaram a ser efetivamente utilizados, uma vez que, para o tipo de solo apresentado, o limite de funcionamento de 80 kPa de sucção não abrangia os intervalos de variação de potencial matricial, que eram muito superiores, e, conseqüentemente, da umidade do solo envolvidos na pesquisa. Nesse estágio, adotou-se a estratégia de elevação do nível de saturação do solo, que, teoricamente, possibilitou a formação de uma interface definida entre o solo muito úmido, tido como saturado, e o solo seco.

Além disso, coletaram-se dados de reflectância de uma bateria de corpos de prova cilíndricos, montados em duplicata utilizando-se de tubos de PVC com diâmetro e altura de 100 mm, preenchidos por latossolo vermelho-escuro com massa específica aparente igual à adotada nas colunas de solo. Nesses corpos de prova variaram-se as espessuras de duas camadas de solo com distintos teores de umidade, tendo a camada inferior teor de umidade

elevado e com espessura entre 5,0 e 9,5 cm e a camada superior com baixo teor de umidade e espessura entre 5,0 e 0,5 cm, respectivamente, além de corpos de prova referenciais em que um foi totalmente preenchido por solo seco e o outro por solo úmido.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

4.1.1. O solo e sua coleta

A Embrapa (1978) efetuou o levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal, no qual constatou a ocorrência predominante (85,49 %) dos solos Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo e Cambissolo, com 38,63 %, 15,84 % e 31,02 % da área, respectivamente. Em menores proporções, ainda se têm presentes os solos classificados como Podzólicos, Brunizens Avermelhados, Solos Aluviais, Solos Hidromórficos Indiscriminados, Areias Quartzosas e Terra Roxa Estruturada.

Tendo em vista a representatividade dos latossolos no Distrito Federal, optou-se por realização do trabalho com latossolo vermelho-escuro. Coletaram-se aproximadamente 400 kg desse solo na Estação Hidrometeorológica da UnB, entre 0 e 90 cm de profundidade, quantidade suficiente para a montagem das colunas de solo e realização dos demais ensaios de laboratório.

Após secagem ao ar durante 2 semanas, o mesmo foi passado na peneira nº 4 (malha 4,8 mm), homogeneizado, pesado em frações de 5 kg, embalado e, por fim, retiradas amostras para constatação do teor de umidade higroscópica.

Posteriormente, procedeu-se à caracterização do solo, determinando-se a granulometria, a massa específica real, o teor de matéria orgânica, a análise mineralógica e a curva característica.

O solo restante foi utilizado na montagem das colunas de solo que, apesar de não representarem completamente o arranjo do solo encontrado *in situ*, foram compactadas com massa específica aparente próxima da encontrada *in situ* de modo a reproduzir uma aproximação do mesmo. Para a obtenção da massa específica aparente extraíram-se amostras de solo indeformada *in situ* com um extrator de amostras, conforme ABNT (1987).

4.1.2. Composição granulométrica

A composição granulométrica do solo foi determinada por meio de ensaio que combina peneiramento e sedimentação (ABNT, 1984), utilizando método do densímetro. O ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia da UnB.

4.1.3. Teor de matéria orgânica

Na avaliação do teor de matéria orgânica empregou-se o método Walkey-Black (Oliveira *et al.*, 2000), ensaio em que o teor de matéria orgânica é estimado por meio da titulação do excesso de dicromato de potássio 1 N em meio ácido com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N, utilizando difenilamina 0,16 % como indicador. O ensaio foi realizado no Laboratório de Análise de Água da UnB.

4.1.4. Umidade do solo

Na obtenção do teor de umidade do solo por método gravimétrico em laboratório, a ABNT (1986) recomenda que o solo seja secado em estufa capaz de manter temperatura entre 105 ° C e 110 ° C. Porém, para os casos em que o solo seja orgânico ou turfoso recomenda, ainda, devido à possibilidade de oxidação e volatilização acidental de uma parcela da matéria orgânica eventualmente presente no solo, secagem à temperatura entre 60 ° C e 65 ° C. Neste caso, Gardner (1986) sugere um limite inferior, adotando temperatura de 50 ° C. O intervalo de tempo necessário para completa secagem do solo está associado às temperaturas adotadas, ao tipo e quantidade de solo, sendo que a ABNT (1986) comenta que intervalos de tempo próximos a 24 horas são suficientes para o intervalo de temperatura maior.

Neste trabalho optou-se por testar previamente os limites de tempo e temperaturas adequados para secagem do solo estudado por meio de um ensaio em que se acompanharam durante um intervalo de 72 horas as mudanças no teor de umidade de amostras de solo previamente umedecidas e secadas em duas estufas distintas no Laboratório de Análise de Água da UnB, mantendo-se uma à temperatura de +/- 105 ° C e a outra a +/- 55 ° C. Após esse intervalo de tempo, as amostras foram submetidas a ensaio para estimativa do teor de

matéria orgânica presente, de modo a constatar se houve ou não perdas da matéria orgânica devido ao processo de secagem.

4.1.5. Análise mineralógica

A análise mineralógica se restringiu à identificação da presença de alguns minerais no solo por meio da análise de difratometria de raios-X, que se baseia na lei de Bragg (Gomes, 1984):

$$n_i \lambda = 2 d \operatorname{sen} \varphi \quad (4.1)$$

em que λ é o comprimento de onda da radiação X (aproximadamente monocromática), d é a distância entre os planos de um cristal e φ é o ângulo de Bragg (complemento do ângulo de incidência) e n_i é um número inteiro correspondente à ordem de difração.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da UnB utilizando o difratômetro RIGAKU-D/MAX-2A/C operando com tubo de cobre com 40kV e 20 mA, adotando-se varredura de 2° a 70° 2θ com velocidade de 2° por minuto (no processo de obtenção dos difratogramas, o detector é rotacionado com velocidade duas vezes maior que a velocidade da amostra, resultando em uma geometria a que ao ângulo de incidência θ sobre a amostra associa um ângulo de 2θ do detector). Na interpretação dos difratogramas foi empregado o *software* JADE (MDI, 1991), que dispõe de diversas rotinas já implementadas para a interpretação, possuindo inclusive um banco de dados mineralógico.

O ensaio foi realizado com fração total do solo, já que era de interesse a identificação dos minerais constituintes do mesmo, não se restringindo somente à fração argila.

4.1.6. Curva característica

Na obtenção dos dados necessários à determinação da curva característica empregaram-se células de pressão do modelo Tempe Pressure Cell 1405 (Soilmoisture, 1995), em que se instalaram discos de porcelana mantidos sob pressão atmosférica na parte inferior. Após o devido alojamento de anéis metálicos contendo amostras de solo saturado com vedação lateral mantida por anéis de *neopren* e fechamento das células, a pressão de ar na

parte superior da mesma foi mantida com valor conhecido, maior que a pressão atmosférica. O ar pressurizado promovia o deslocamento da água contida no solo em direção à placa cerâmica até que a tensão capilar da água no solo se equilibrasse com a diferença de pressão. O reduzido diâmetro dos poros da placa cerâmica impedia a penetração de ar na mesma.

A principal vantagem do método de determinação da curva característica utilizando células de pressão individual é a necessidade somente de um corpo de prova para obtenção dos pontos da curva característica. A utilização de réplicas possibilitou a obtenção de uma curva média. Utilizaram-se 3 corpos de prova deformados, montados diretamente dentro dos anéis metálicos com massa específica de $1,20 \text{ g/cm}^3$. A pressão aplicada se restringiu ao valor de pressão de entrada de ar no disco de porcelana, tendo sido empregados discos de pressão máxima de 100 kPa. Apesar do nível de pressão de 100 kPa ser baixo em relação ao potencial matricial observado em solos argilosos, o mesmo é compatível com as pressões possíveis de serem lidas em tensiômetros de vácuo, que se limitam a valores entre 70 e 80 kPa.

Na figuras 4.2 (a) e (b) são apresentados a célula de pressão e o quadro distribuidor Manifold (quadro com medidor, regulador de pressão de ar e seis saídas de ar) conectado a um compressor de ar, respectivamente. Os equipamentos pertencem ao Laboratório de Análise de Água da UnB.

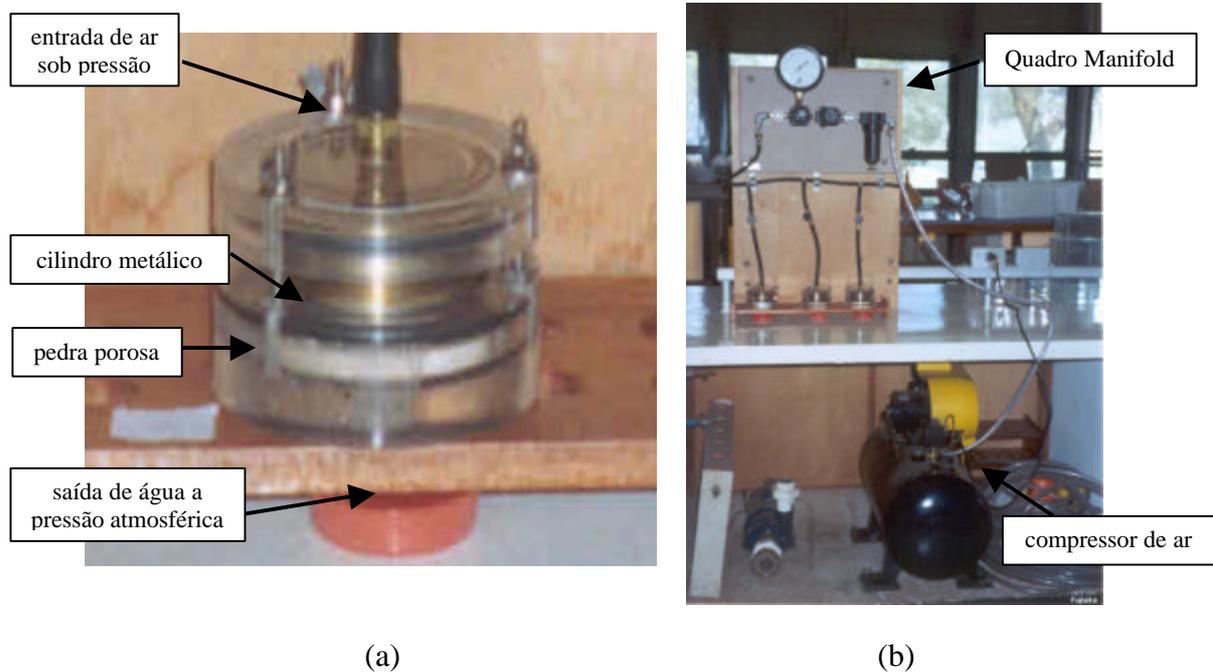


Figura 4.2 - (a) Célula de pressão e (b) Quadro Manifold

4.1.7. Curva de compactação do solo

A compactação de um solo, de acordo com a energia utilizada para compactação, pode ser denominada de compactação estática ou compactação dinâmica. Adotou-se a compactação estática, uma vez que, de acordo com Vargas (1978), estando as partículas de solo sem orientação privilegiada, a compactação estática manteria a falta de orientação, levando a uma estrutura desorganizada próxima da floclada, que é a estrutura que ocorre no solo indeformado. Enquanto que um pisoteamento ou impacto sobre as partículas tenderia a orientá-las no sentido de se aproximar de uma estrutura dispersa.

A curva de compactação estática do solo foi determinada no Laboratório de Geotecnia da UnB utilizando-se de uma prensa mecânica manual dotada de rosca infinita similar à utilizada por Lanças *et al.* (1993), em que se aplicaram distintas pressões de compactação a amostras de solo em diferentes teores de umidade comportados por recipientes cilíndricos com diâmetro de 100 mm e altura de 110 mm, compactadas em duas camadas de 55 mm cada, de modo a possibilitar a escolha do teor de umidade adequado e da energia de compactação correspondente à massa específica adotada de aproximadamente $1,20 \text{ g/cm}^3$ (esse solo em condições de campo a uma profundidade de 80 cm apresenta massa específica de aproximadamente $1,10 \text{ g/cm}^3$).

4.2. AMBIENTE DE TRABALHO E EQUIPAMENTO PARA COLETA DE DADOS ESPECTRAIS

4.2.1. Ambiente de trabalho

Os ensaios deveriam ser realizados em laboratório dotado de equipamentos específicos para controle da temperatura e umidade relativa do ar. Porém, devido à inviabilidade de alocação de um espaço físico específico com estrutura adequada na UnB, os ensaios foram realizados no Laboratório de Hidráulica, que não possuía a estrutura necessária. Como também era requisito a minimização das interferências do ambiente na coleta de dados espectrais, montaram-se duas cabanas de lona plástica preta, sendo a cabana 1 com dimensões de 2,60 m x 2,00 m x 4,00 m recobrando as colunas de solo, espectrorradiômetro e tripé da lâmpada e a cabana 2 com dimensões de 1,60 m x 0,80 m x 2,50 m utilizada nos demais

ensaios, tais como para avaliação da geometria fonte-alvo-sensor, avaliação dos efeitos de adjacência, entre outros.

4.2.2. O espectrorradiômetro GER 2600, sua instalação e utilização

O espectrorradiômetro GER 2600 possui dois espectrômetros. O primeiro, que é composto por 512 detectores de silício, efetua medidas no intervalo de 0,30 a 1,05 μm com resolução espectral de 0,0015 μm . O segundo, utiliza um conjunto de 128 detectores de PbS, funcionando no intervalo de 1,05 a 2,50 μm , com resolução de 0,0115 μm (GER, 1998).

O campo de visada padrão da unidade detectora é de 3° , entretanto pode ser modificado para 10° ou 180° (coletor co-seno) por meio de dispositivos ópticos adicionais. É alimentado por uma bateria externa recarregável de 12 V e permite leituras de fator de reflectância bidirecional em campo ou em laboratório. Possui um feixe de *laser* para posicionamento da placa de referência *spectralon* e amostra sob o campo de visada do instrumento. O equipamento é ligado diretamente a um computador dotado de um *software* específico para conversão dos sinais elétricos em dados de radiância e reflectância.

A rotina de aquisição de dados de fator de reflectância bidirecional incluía os seguintes procedimentos de montagem dos equipamentos e de leitura:

- a) montagem do espectrorradiômetro sobre tripé (considerando a altura adotada na geometria de leitura);
- b) nivelamento do espectrorradiômetro horizontalmente e verticalmente (em ângulo zenital);
- c) conexão dos cabos de alimentação (bateria) e transmissão de dados (computador);
- d) inicialização do computador e, posteriormente, acionamento do equipamento;
- e) averiguação do posicionamento da fonte de iluminação, conforme geometria de leitura adotada e do posicionamento da placa de referência sobre a superfície alvo com o uso do feixe de *laser*;
- f) medição da reflectância da placa de referência *spectralon* branca;

- g) remoção da placa de referência do campo de visada do espectrorradiômetro e medição da resposta espectral do solo;
- h) desativação do aparelho primeiramente, e, em seguida, desconexão do computador. O fabricante recomenda que tal procedimento seja seguido irrestritamente, uma vez que a não obediência pode causar danos ao equipamento.

Na figura 4.3 é apresentado o comportamento espectral da placa *spectralon* branca calibrada pelo fabricante, em laboratório, para o espectrorradiômetro GER 2600 com relação a um padrão cuja reflectância era conhecida. Apesar da placa de referência utilizada na coleta de dados espectrais não possuir reflectância unitária, as curvas espectrais coletadas não foram corrigidas em relação à calibração, já que as análises realizadas foram todas relativas. Ademais, tal procedimento acarretaria em redução do intervalo de variação da reflectância nas curvas espectrais.

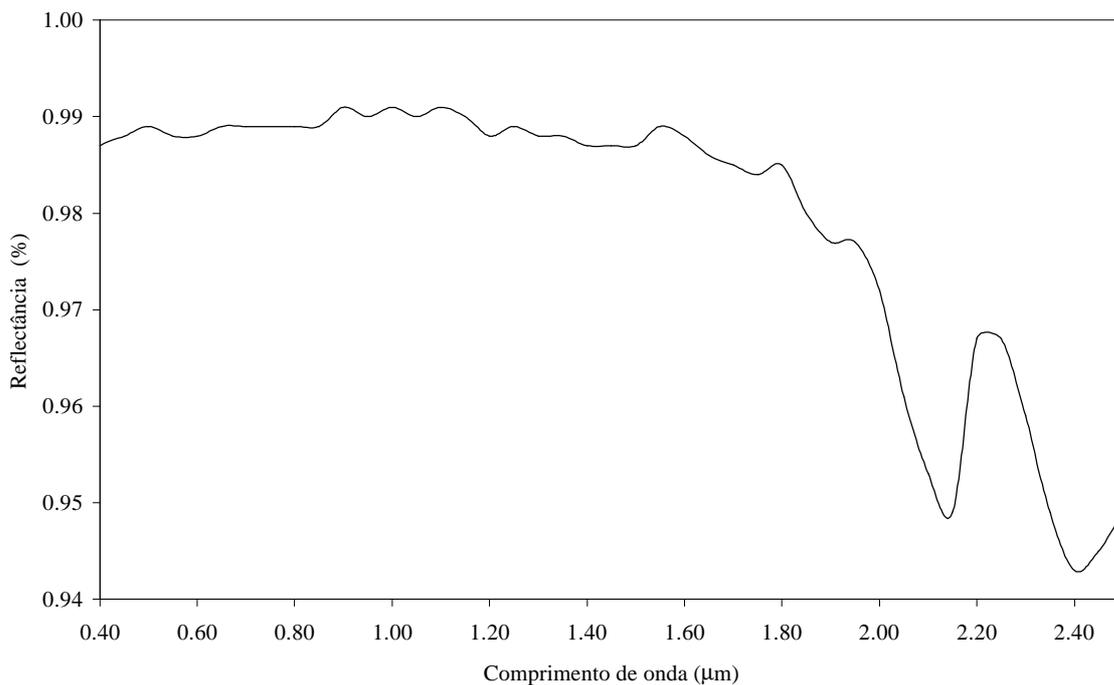


Figura 4.3 - Curva de calibração da placa de referência fornecida pelo fabricante

Fonte: Labsphere (1998)

4.3. ETAPA DE TESTES PRELIMINARES

4.3.1. Definição da geometria fonte-alvo-sensor e comparação entre os espectros da lâmpada e do Sol

A geometria fonte-alvo-sensor compreendia as definições das alturas entre o sensor e o alvo e entre a fonte de radiação e o alvo, dos ângulos de iluminação e de posicionamento do sensor, padronizadas para todas as leituras.

Utilizou-se, como fonte de radiação eletromagnética, uma lâmpada halógena de iodeto de tungstênio com potência de 1.000 W e temperatura de funcionamento de 3.400 K, com feixe não colimado ao plano da amostra.

Tradicionalmente, vários autores, como Valeriano *et al.* (1995) e Galvão e Vitorello (1998), adotam em trabalhos de laboratório uma altura de 60 cm entre o alvo e o sensor e de 90 cm entre a fonte de radiação artificial e o alvo, aproximadamente. Essa altura para um ângulo de visada de 3° equivale a uma superfície visada com diâmetro de 3,15 cm, sendo compatível com os experimentos de laboratório.

O posicionamento do sensor na direção do retroespalhamento da radiação eletromagnética acarreta em aumento da reflectância em relação ao posicionamento no nadir devido à atenuação dos efeitos da sombra causada pela rugosidade superficial do solo sobre o sinal recebido pelo sensor (Accioly e Huete, 2000), porém, como em laboratório as amostras são preparadas de tal maneira a minimizar os efeitos da rugosidade, é praxe a utilização do equipamento com ângulo zenital de 0° (Baumgardner *et al.*, 1985). Portanto, adotou-se o posicionamento no nadir.

Por sua vez, quanto maior os ângulos de iluminação maiores serão as contribuições do espalhamento da radiação eletromagnética sobre o sinal. Kimes e Kirchner (1982) relataram que os erros sobre a irradiância espectral para ângulos solares zenitais de 0°, 45°, 60° e 75° foram de 0,6 %, 6 %, 13 % e 27 %, respectivamente.

Na figura 4.4 tem-se um esquema ilustrativo da geometria fonte-alvo-sensor adotada.

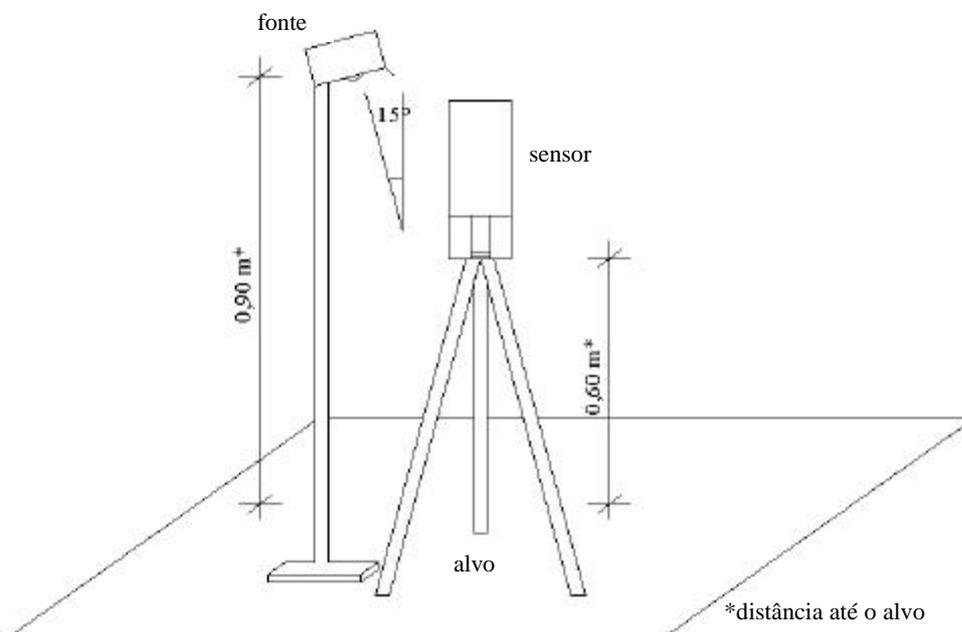


Figura 4.4 - Geometria fonte-alvo-sensor

Como o Sol possui uma temperatura irradiante de 6.000 K e a lâmpada utilizada no ensaio possui temperatura de funcionamento nominal de 3.400 K, optou-se por comparar o espectro de emissão da lâmpada e do Sol de modo a se constatar as diferenças entre os dois e avaliar se tais diferenças interferem sobre a resposta espectral obtida por meio da reflectância bidirecional. Além disso, também se acompanharam as variações da reflectância ao longo do tempo tendo como alvo a placa *spectralon* sujeita à radiação emitida pela lâmpada.

4.3.2. Avaliação da tensão da rede elétrica

Como eventuais oscilações na excitância da lâmpada, que acarretariam em ruídos nas curvas espectrais, poderiam ser atribuídas às oscilações na tensão da rede elétrica, a mesma foi monitorada ao longo de um dia, por meio da utilização de um multímetro.

4.3.3. Avaliação dos efeitos de adjacência

De acordo com a geometria fonte-alvo-sensor adotada o diâmetro da área visada pelo sensor foi de, aproximadamente, 3,15 cm. No entanto, por se tratar de superfície não lambertiana, a reflectância difusa que atingia o sensor era composta pela somatória da radiação refletida pelo alvo acrescida da radiação advinda das adjacências do alvo, além de um acréscimo devido ao espalhamento da radiação que sequer atingiu o alvo. Portanto, apesar dos ensaios terem sido realizados em cabanas de lona plástica preta, os equipamentos instalados dentro da mesma e, até mesmo, o movimento do operador poderiam vir a provocar interferências sobre as leituras realizadas.

Os efeitos de adjacência sobre a resposta espectral de um solo foram avaliados a partir da coleta de dados espectrais de corpos de prova cilíndricos montados em tubos de PVC com diâmetro e altura de 100 mm circundados por um círculo de papel branco com diâmetro de 50 cm, já que as superfícies brancas refletem toda a radiação incidente no intervalo do visível e caso a mesma estivesse interferindo na resposta espectral, ao se diminuir o círculo branco a reflectância diminuiria. Daí, optou-se por coletar respostas espectrais em outras três situações, alterando as superfícies adjacentes aos cilindros, circundando-os por círculos de papel branco com diâmetros de 40 e 30 cm, e, ainda, somente circundado por tecido na cor preta, conforme figura 4.5. Além disso, foram coletadas curvas espectrais referenciais dos círculos brancos e do tecido preto para que se pudessem comparar com as demais curvas coletadas.

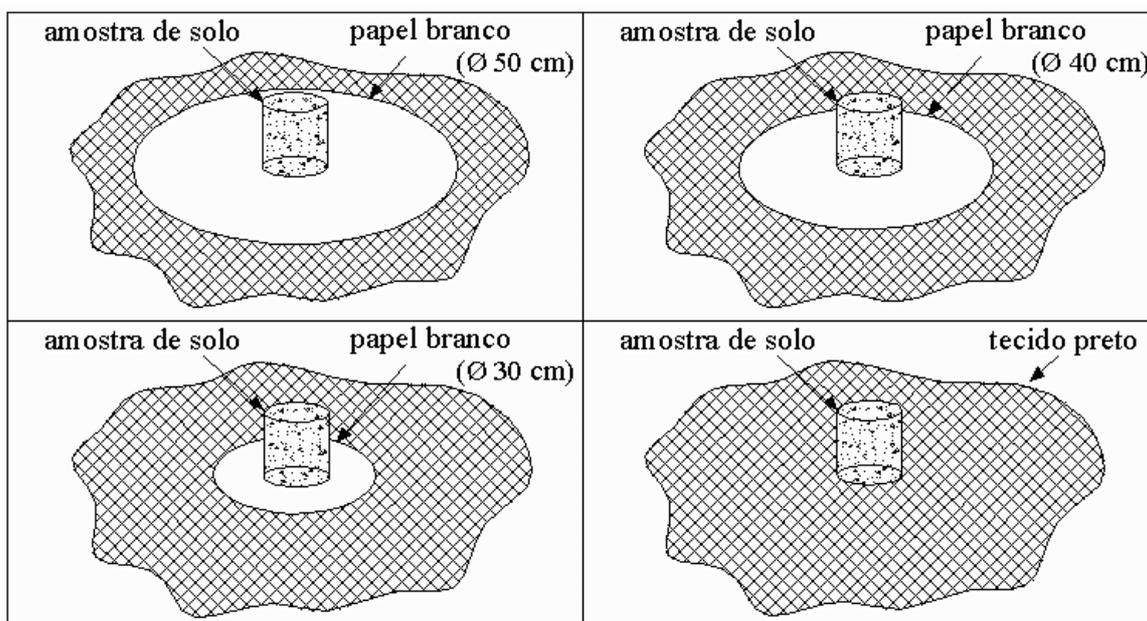


Figura 4.5 - Corpos de prova cilíndricos

Na aquisição das medidas, foram obtidas três leituras, que tiveram por finalidade suavizar os ruídos aleatórios intrínsecos ao detector, em quatro posições distintas (dadas por giros dos cilindros de 90°) para permitir comparações entre os diversos cilindros minimizando eventuais diferenças de rugosidade.

4.4. ETAPA PRINCIPAL

A etapa principal constituiu-se dos ensaios realizados no Laboratório de Hidráulica da UnB com duas colunas de solo e corpos de prova cilíndricos, utilizando uma lâmpada como fonte de radiação, em que se alteraram os teores de umidade do solo nas camadas subjacentes à superfície. No entanto, apesar da etapa principal do trabalho e alguns testes terem sido realizados em laboratório, como não foi adotado controle de temperatura e de umidade relativa do ar os dados obtidos estiveram sujeitos às variações micro-climáticas.

A despeito das estruturas das colunas de solo teoricamente serem transportáveis, a movimentação até o ambiente externo para coleta de dados espectrais, utilizando o Sol como fonte de radiação eletromagnética (para efeito de validação dos resultados), não era recomendada, devido à possibilidade de ruptura, ou melhor, modificação da estrutura interna dos solos provocada por vibrações no manuseio das mesmas.

4.4.1. Estrutura das colunas de solo

A estrutura das colunas de solo era constituída por uma chapa metálica dobrada, com lados de 0,30 m e altura de 1,50 m, sendo a parte frontal recoberta por uma placa de acrílico, que permitia a visualização da ascensão da frente úmida, conforme mostrado na figura 4.6. As dimensões das colunas deveriam atender aos requisitos de ser a superfície exposta compatível com os ângulos de visada do equipamento radiométrico e a altura compatível com a ascensão capilar esperada.

Na base da coluna foi instalado um filtro constituído por areia compactada, que propiciou a formação da camada saturada inicial no solo, por meio da entrada de água através do registro instalado junto à base da coluna. O emprego de um frasco de Mariotte (Taylor, 1949) permitiu a entrada de água sempre com a mesma pressão.

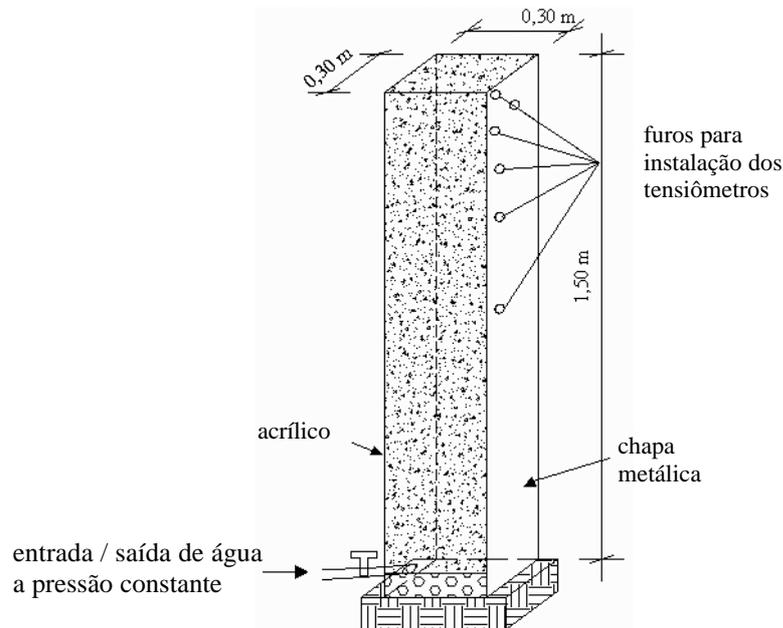


Figura 4.6 - Configuração física das colunas de solo

4.4.2. Montagem das colunas de solo

4.4.2.1. Compactação do solo nas colunas

A compactação estática do solo na coluna foi realizada no Laboratório de Estruturas da UnB, empregando-se um macaco hidráulico acoplado a um portal de aplicação de cargas e interligado a um marcador digital, limitado a 50.000 kg e com precisão de 5 kg, conforme ilustrado na figura 4.7.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.7 - Compactação e transporte das colunas de solo: (a) macaco hidráulico e portal de aplicação de carga; (b) compactação em camadas; (c) vedação e fechamento da coluna e (d) transporte da coluna

Apesar da provável formação de uma estrutura rudimentarmente floclada na coluna de solo devido à adoção de compactação com umidade no ramo seco, ainda haveria um direcionamento das partículas em direção perpendicular ao plano de aplicação da carga. Portanto, optou-se por compactar a coluna de solo na horizontal em cinco camadas de aproximadamente 6 cm cada (figura 4.7 (b)), uma vez que esse direcionamento das partículas permitiria a simulação do fluxo de água que ocorre naturalmente em condições de campo, ou seja, maior na direção vertical do que na direção horizontal. Após a compactação de cada camada, a superfície era escarificada antes da compactação da camada seguinte, de maneira a minimizar a formação de interfaces.

Ao final da compactação, a superfície foi rasada, instalada a vedação e devidamente fechada com uma placa de acrílico para que se permitisse a visualização da ascensão capilar quando do processo de molhamento da coluna de solo (figura 4.7 (c)). Finalizados esses procedimentos, as colunas foram transportadas por meio do uso de um guindaste de maneira a evitar a desestruturação da compactação e colocadas na posição vertical (figura 4.7 (d)).

Posteriormente, procedeu-se à instalação dos tensiômetros de vácuo.

Esses procedimentos foram repetidos para a montagem das duas colunas.

4.4.2.2. Instalação dos tensiômetros de vácuo

Tensiômetros de vácuo são equipamentos constituídos de uma cápsula porosa instalada na extremidade inferior de um tubo conectado a um manômetro e, na extremidade superior desse tubo, a um dispositivo para vedação e retirada de bolhas de ar (figura 4.8 (a)). Quando instalados em um meio poroso não saturado, a pressão da água dentro do tubo do tensiômetro entra em equilíbrio com a umidade do solo por meio da cápsula porosa e, por sua vez, o manômetro acusa as variações de pressão no interior do tubo.

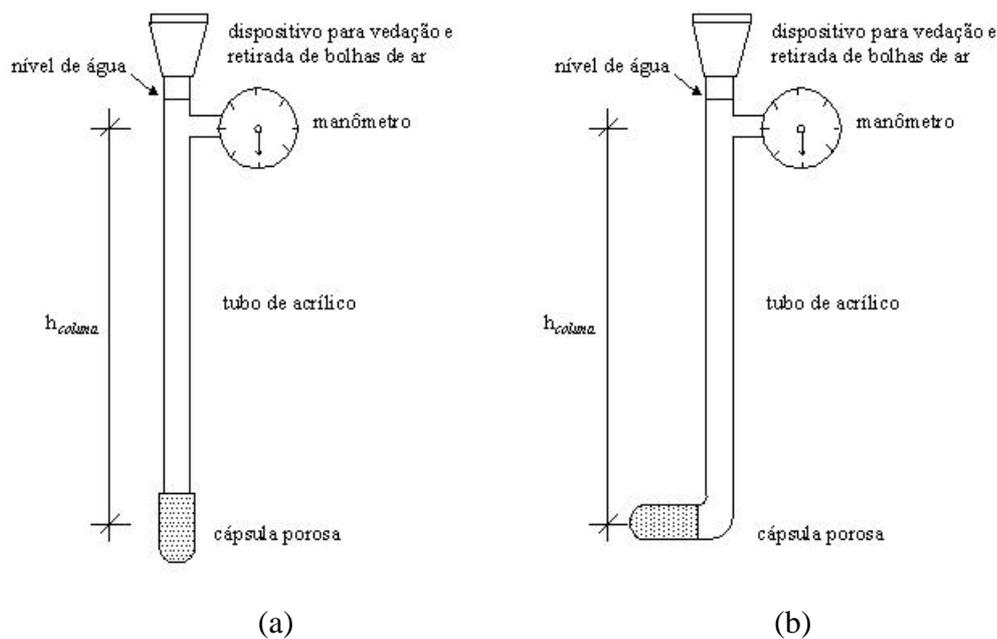


Figura 4.8 – Tensiômetros de vácuo: (a) tradicional e (b) adaptado para instalação na lateral das colunas de solo

Tensiômetros de vácuo do tipo *Jet Fill* (Soilmoisture, 1997) foram adaptados, por meio da confecção de conexões em *nylon*, para serem instalados na lateral da coluna de solos com a cápsula porosa na horizontal e a coluna de água na vertical, conforme ilustrado na figura 4.8 (b).

Dada a dimensão das colunas de solo, os tensiômetros com as devidas adaptações foram instalados na lateral das colunas de solo nas profundidades de 3, 6, 9, 15, 30 e 50 cm.

De acordo com ASTM (1994), o tempo de resposta dos tensiômetros é imediato, desde que seja removido todo o ar do interior do tubo, devendo-se, inclusive, ser utilizada água deaerada no preenchimento do mesmo, caso contrário seu funcionamento pode ser prejudicado pelo ar presente na água. Além disso era necessário que a vedação do mesmo fosse perfeita, exigindo manutenção periódica, com o reenchimento por água deaerada. Porém, esse equipamento está restrito a medições inferiores a uma atmosfera, atingindo uma pressão negativa máxima de 80 kPa.

4.4.3. Molhamento das colunas de solo e coleta de dados

As simulações dos diferentes teores de umidade do solo ao longo da coluna deveriam ocorrer de maneira que a umidade na superfície permanecesse, aproximadamente, constante. Apesar dos perfis de umidade do solo serem função do grau de compactação, granulometria, entre outros, de maneira geral, o perfil usual seria como apresentado na figura 4.9, portanto formando uma curva com decrescentes teores de umidade a partir da camada saturada. Após o início do molhamento com pressão de entrada equivalente à altura do filtro de areia, com conseqüente saturação dessa camada, acompanhou-se o nível da frente de ascensão capilar por meio da mudança de coloração do solo visualizada através da parede de acrílico até a sua estabilização.

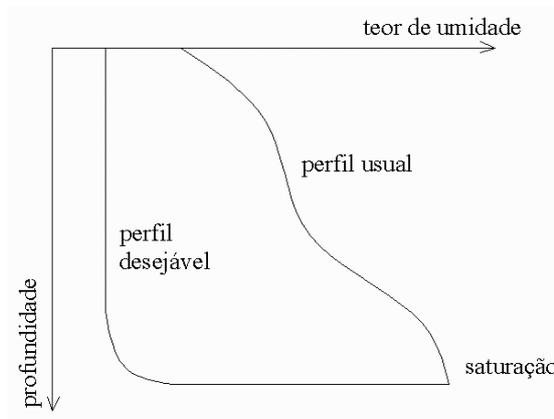


Figura 4.9 - Perfil de água no solo

Após essa fase, havia duas opções, que seria a elevação lenta do nível de saturação ou a elevação rápida do nível de saturação. No primeiro caso, a elevação da frente de ascensão capilar afetaria, eventualmente, a coleta de dados, uma vez que provocaria alteração gradual do teor de umidade na superfície do solo, não permitindo as devidas comparações entre as curvas espectrais. No segundo caso, a elevação rápida do nível de saturação, supostamente, propiciaria a formação de uma interface definida entre o solo muito úmido e o solo seco, se aproximando do perfil desejável, de acordo com a metodologia adotada, apresentado na figura 4.9. Optou-se pela última opção.

Como havia a possibilidade de aplicação de sucção na coluna de solo para eventual controle da ascensão da frente úmida a realizar-se pela parte inferior das colunas, estas foram colocadas sobre um tablado com altura de 60 cm. Além disso, sobre esse tablado foi instalado um segundo tablado, vazado na área das colunas, com 70 cm de altura, de modo a propiciar

altura necessária para instalação adequada dos tripés do espectrorradiômetro e da lâmpada, conforme pode ser verificado nas figuras 4.9 (a) e (b).

À medida que, inicialmente, a ascensão capilar e, posteriormente, o nível de saturação se elevavam, os dados de reflectância eram coletados utilizando-se do espectrorradiômetro GER 2600, conforme ilustrado na figura 4.10 (b) e (c).

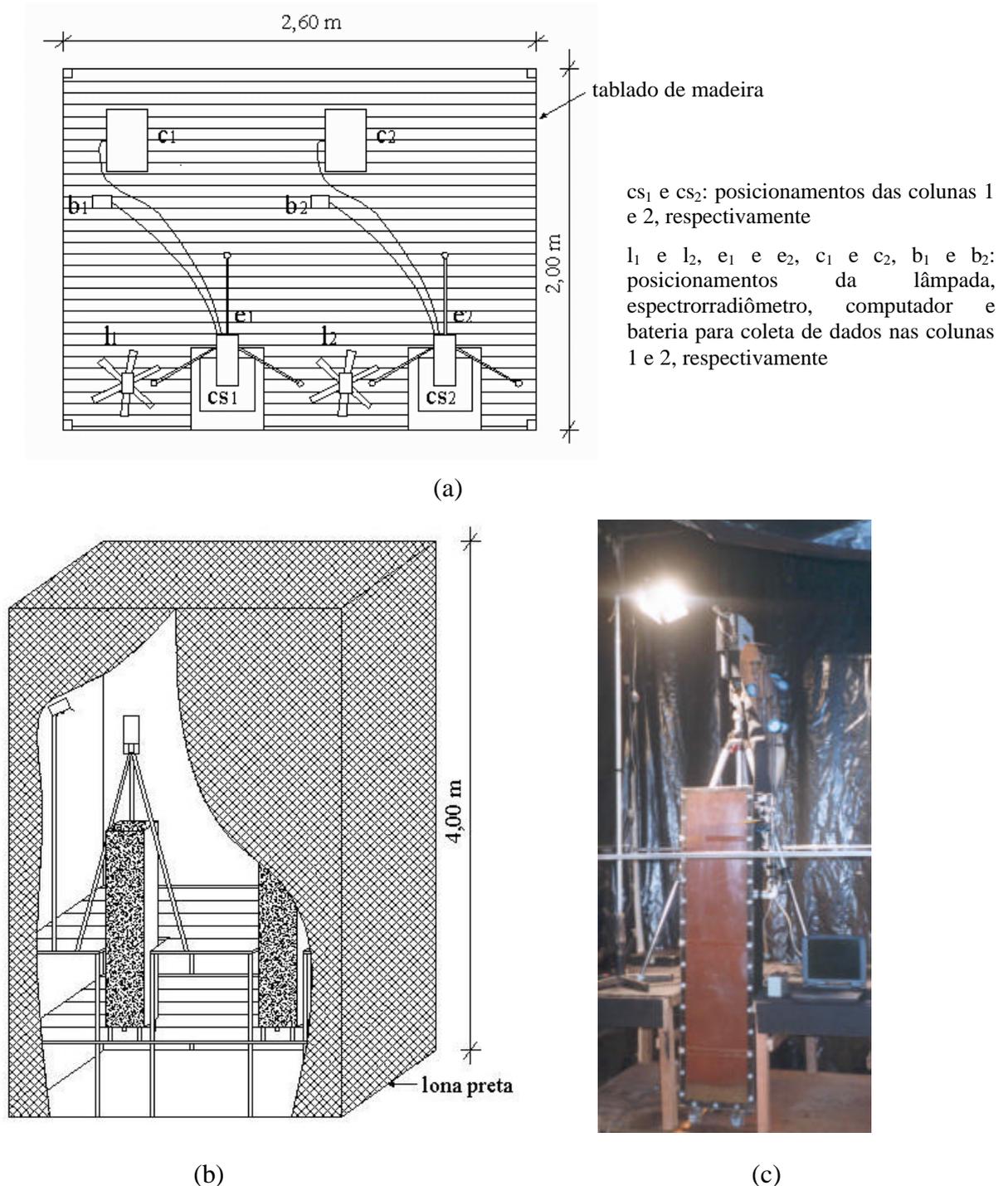


Figura 4.10 - Coleta de dados espectrais nas colunas de solo: (a) locação das colunas e equipamentos sobre os tabladros; (b) cabana para coleta de dados e (c) coleta de dados

4.4.4. Corpos de prova cilíndricos

Apesar da mudança de cor no solo, devido à umidade, ter se dado ao longo de uma linha bem definida nas colunas de solo, indicando a existência de uma interface solo úmido / solo seco, provavelmente a frente de umidade não coincidia absolutamente com a frente de saturação por causa do efeito da ascensão capilar. Portanto, não era possível afirmar com certeza sobre o teor de umidade na linha da frente de umedecimento.

Portanto, complementarmente aos ensaios realizados nas colunas de solo, optou-se por coletar dados espectrais de uma bateria de doze corpos de prova cilíndricos com diâmetro e altura de 100 mm montados com duas camadas de solo em tubos de PVC, sendo a primeira camada relativamente úmida e a segunda camada relativamente seca. Os doze corpos de prova foram montados dois a dois com as camadas úmida e seca, respectivamente, com espessura de 5 e 5 cm, 6 e 4 cm, 7 e 3 cm, 8 e 2 cm, 9 e 1 cm e os últimos com 9,5 e 0,5 cm. Além desses, outros quatro corpos de prova foram utilizados na coleta de dados espectrais, sendo dois completamente preenchidos por solo úmido e os outros dois preenchidos por solo seco. A camada inferior foi compactada em laboratório utilizando-se de uma prensa mecânica manual, conforme descrito anteriormente e, para que se evitasse a ascensão capilar, a camada superior foi compactada imediatamente antes da coleta dos dados espectrais, por meio de compactação manual empregando um pistão com diâmetro equivalente ao diâmetro dos cilindros de PVC.

Na coleta dos dados espectrais, com o objetivo de diminuir as interferências da rugosidade das superfícies das amostras, optou-se por considerar a média de quatro leituras espectrais coletadas com as amostras rotacionadas em intervalos de 90°, adotando-se a geometria fonte-alvo-sensor padronizada anteriormente.

A expectativa desse ensaio, como nas colunas de solo, seria de que, caso o solo úmido das camadas inferiores afetasse efetivamente a resposta espectral, ocorreria um ordenamento das curvas espectrais em função da distância dessas camadas úmidas em relação à superfície.

5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e algumas discussões pertinentes.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

5.1.1. Granulometria

Considerando a curva granulométrica apresentada na figura 5.1 e de acordo com ABNT (1984), o latossolo vermelho-escuro em estudo tem textura muito argilosa, possuindo um pouco mais que 60 % de solo na fração argila e estrutura bastante porosa, com massa específica aparente e real de $1,10 \text{ g/cm}^3$ e $2,64 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. Portanto, a textura e o arranjo dos grãos (interações macroscópicas) desse solo nas condições de campo contribuem para diminuição da reflectância (Meneses, 2000a). Além disso, de acordo com Galvão *et al.* (1997), essa textura concorre para a expectativa de baixas reflectâncias, porque normalmente solos com textura de argila possuem maior quantidade de matéria orgânica, óxidos de ferro e argilominerais que solos arenosos.

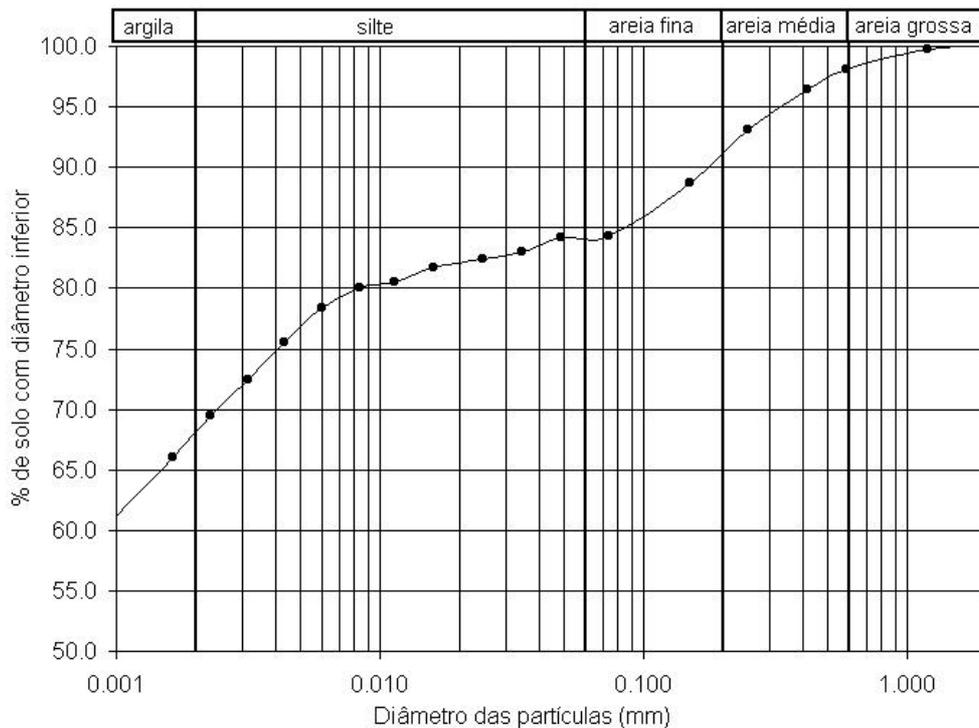


Figura 5.1 - Curva granulométrica

Ademais, a textura está diretamente relacionada com a capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, com as implicações dessa sobre a reflectância, fato observado por Houssa *et al.* (1996). E, ainda, a água, por meio dos ciclos de umedecimento e secagem do solo, propicia um rearranjo superficial do mesmo, acarretando em uma alteração da rugosidade na direção da uniformização da superfície e formação de uma crosta com características específicas. Porém, dada a metodologia de umedecimento único adotado neste trabalho, a possibilidade de um rearranjo superficial foi desconsiderada, excluindo, obviamente, a fase de rearranjo global das partículas nas colunas de solo após o levantamento das mesmas até a posição vertical (fase de montagem das colunas de solo).

5.1.2. Matéria orgânica

As amostras avaliadas possuíam em média um teor de matéria orgânica de 2,7 %, sendo superior ao limite de 2,0 % estabelecido por Baumgardner *et al.* (1970) como sendo o suficiente para mascarar outras propriedades no comportamento espectral.

Além disso, a matéria orgânica é opaca e altera a cor do solo, portanto influenciando a reflectância, de modo geral, no sentido de sua diminuição ao longo de todo o espectro do visível ao infravermelho de ondas curtas. Portanto, tal teor de matéria pode ter contribuído na diminuição do intervalo de variação da reflectância em resposta às variações nos teores de umidade ao longo do perfil do solo.

5.1.3. Umidade do solo

No teste efetuado para avaliação da temperatura e intervalo de tempos ideais para secagem do solo para determinação do teor de umidade, foram utilizadas três amostras deformadas de solo. Apesar de se esperar que intervalos maiores fossem requeridos para secagem do solo à temperatura de 55° C, em relação ao intervalo de tempo necessário para secagem à temperatura de 105° C, provavelmente essa temperatura era insuficiente para promover a secagem da água aderida às partículas de solo em diversos estágios de tensão,

uma vez que os dados de umidade, praticamente, se estabilizaram em intervalos de tempo de 30 e 48 horas para as temperaturas de 55° C e 105° C, respectivamente.

A partir dos dados apresentados na tabela 5.1, considerando um intervalo máximo de 72 horas, verificou-se que em média os resultados a 55° C correspondem a 91% da umidade obtida a 105° C, sendo essa diferença muito maior caso se considere somente o solo mais seco (amostra 1).

Tabela 5.1 - Umidade do solo (%) associada ao intervalo de tempo (h) utilizando estufas a 105 ° e 55 ° C para secagem

Amostras	Tempo de secagem (h) Temperatura de secagem (° C)	Umidade do solo (%)					
		6	10	24	30	48	72
1	+/- 105 °C	9,79	9,82	9,93	9,94	10,15	10,15
	+/- 55 °C	8,64	8,84	8,91	8,91	8,92	8,92
2	+/- 105°C	21,93	21,95	21,99	22,02	22,04	22,04
	+/- 55 °C	18,82	20,90	21,01	21,02	21,03	21,03
3	+/- 105 °C	29,24	29,28	29,32	29,35	29,52	29,52
	+/- 55 °C	22,81	27,75	27,99	28,01	28,02	28,02

Ainda que se considere a possibilidade de queima de parte da matéria orgânica a 105° C, os resultados nas duas temperaturas não se equivalem, pois as variações na matéria orgânica presente nas amostras (tabela 5.2) são insignificantes, estando mais associadas ao método experimental, já que o Método Walkey-Black prevê a titulação (imprecisa) de uma amostra muito pequena (0,5 g). Portanto, ratificou-se a hipótese de que talvez o solo submetido à estufa à temperatura de 55° C ainda não estivesse totalmente seco mesmo após um intervalo de 72 horas, indicando que essa temperatura era insuficiente para evaporação da água aderida às partículas do solo utilizado, que possuía textura muito argilosa. Portanto, na determinação da umidade do solo empregou-se secagem em estufa à temperatura de 105° C durante um intervalo de 48 horas.

Tabela 5.2 - Matéria orgânica após processo de secagem

Temperatura de secagem	Matéria orgânica	Porcentagem em relação ao solo seco ao ar
Seco ao ar	2,7 %	100 %
55° C	2,6 %	98 %
105° C	2,5 %	93 %

5.1.4. Análise mineralógica

Utilizando-se o banco de dados mineralógico constante do *software* JADE (MDI, 1991) foi possível identificar alguns minerais que poderiam estar presentes no solo, como, como gibsita, caulinita, hematita, goetita, magnetita, ilmenita, vavelita, anatásio, além do quartzo. No entanto, na interpretação dos difratogramas é necessário cautela de modo a compatibilizar a interpretação apresentada por um software com o realmente possível de ocorrer na natureza (Gomes, 1984). Neste caso, provavelmente não estejam presentes vavelita e anatásio, por serem incomuns em latossolo vermelho-escuro. Além desses, magnetita e ilmenita provavelmente existam em quantidades muito pequenas.

Na figura 5.2 tem-se o difratograma do solo em estudo, em que são apresentados os picos de difração da gibsita, caulinita, hematita, goetita, magnetita, ilmenita e quartzo.

As equações matemáticas que descrevem as relações entre as intensidades das reflexões observadas e a composição percentual de uma mistura de minerais são, via de regra, complexas, sendo que por vezes se empregam métodos semi-empíricos para quantificação dos minerais, recorrendo-se à comparação da intensidade de uma reflexão da amostra com a intensidade da mesma reflexão para padrões adequadamente preparados (Gomes, 1984).

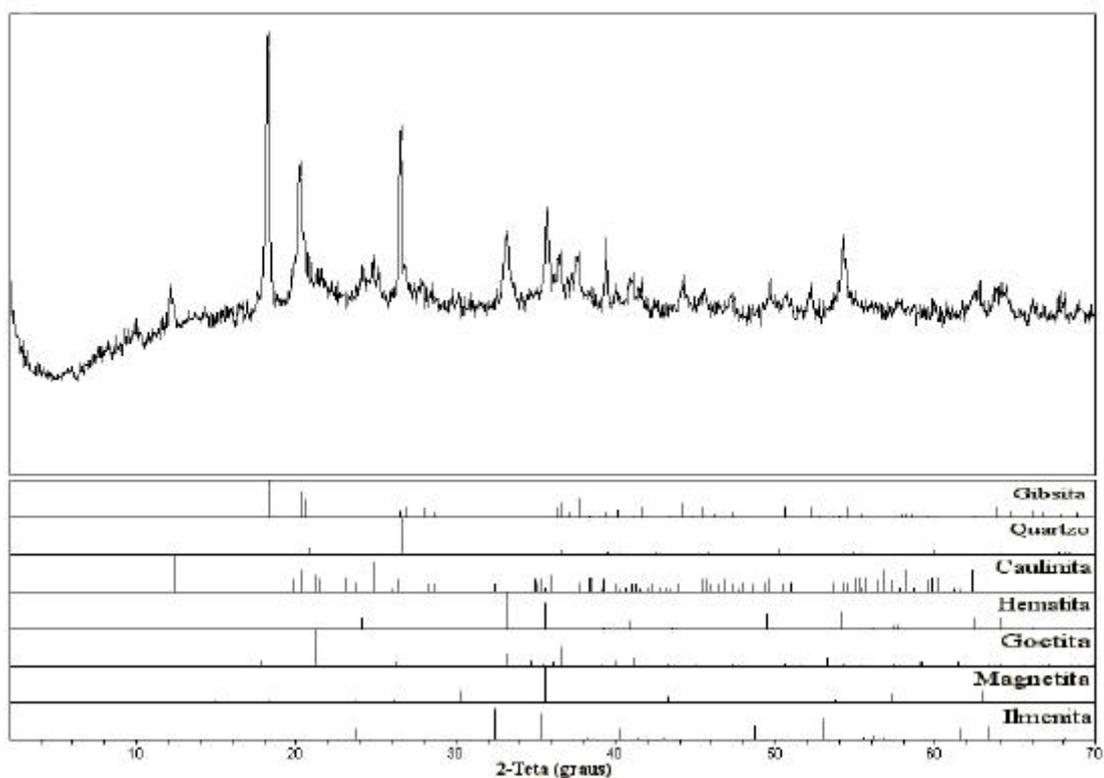


Figura 5.2 - Difratoograma de raios-X do solo estudado

Na figura 5.3 são apresentados, além do difratograma do solo estudado, os difratogramas de amostras padrão contendo gibsita, caulinita e quartzo nas proporções, respectivamente, (3 : 2 : 1), (2 : 2 : 2), (4 : 2 : 0) e (2 : 4 : 0) obtidos entre 10° e 28° 2θ, intervalo em que se observam os principais picos de absorção desses componentes, sendo que os picos da gibsita se encontram em aproximadamente 18° e 20° 2θ, do quartzo em aproximadamente 26° 2θ e da caulinita em aproximadamente 12° 2θ. A semelhança entre os picos atribuídos à gibsita e à caulinita sugere a maior presença relativa desses componentes em detrimento do quartzo, portanto com composição aproximada na proporção 2 de gibsita, 3 de caulinita e 1 de quartzo. Dada a amplitude do pico em aproximadamente 26° 2θ, estima-se que os dois primeiros componentes somam valores superiores a 83 % e, conseqüentemente, o quartzo apresenta proporção inferior a 17 %. Porém, salienta-se que essas possíveis proporções só consideram estes três componentes, pois padrões envolvendo outros componentes ainda não estão disponíveis no Laboratório de Raios-X do Instituto de Geociências da UnB, onde os ensaios foram realizados.

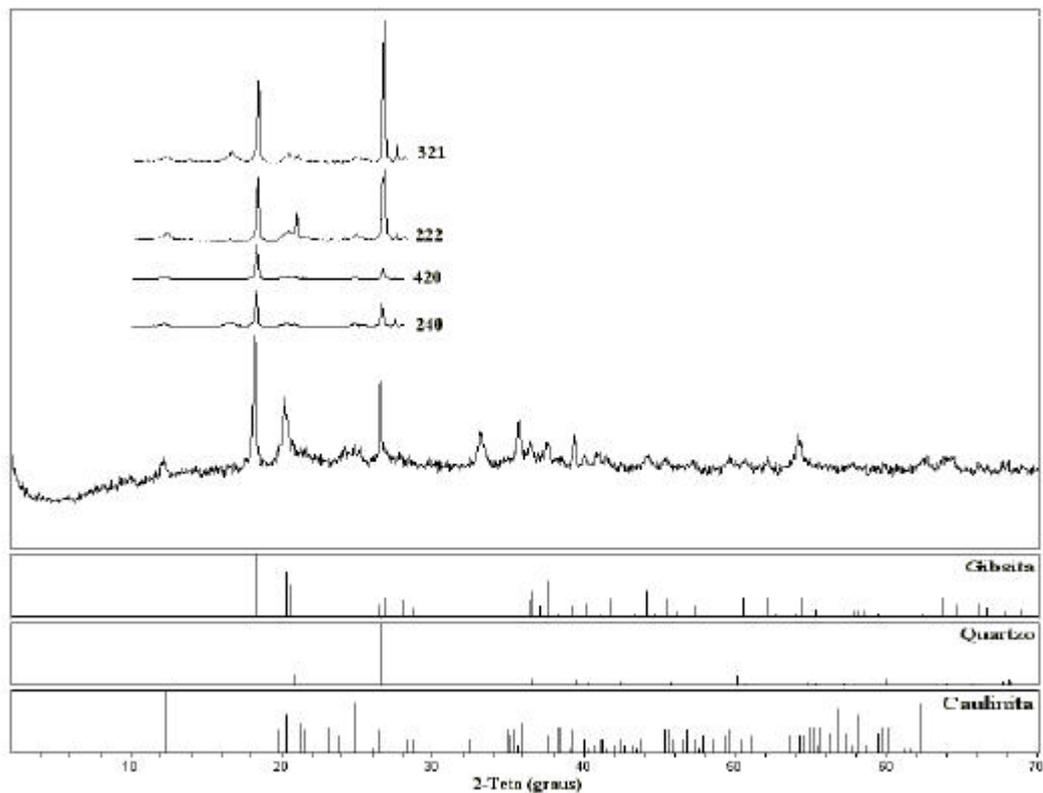


Figura 5.3 - Difratomogramas de raios-X do solo estudado e de amostras padronizadas (proporções relativas de gibsita : caulinita : quartzo)

5.1.5. Curva característica

Na figura 5.4 tem-se a curva característica da amostra de solo estudada para o intervalo de sucção de 0 a 80 kPa, correspondente aos limites de funcionamento de tensiômetros. Observa-se que o teor de umidade do solo é alto, indicando que para o devido acompanhamento do teor de umidade por meio da pressão mátrica seria necessária utilização de equipamentos adequados para observação de sucções muito mais elevadas. Portanto, não se aplicava o emprego de tensiômetros de vácuo para acompanhamento das variações do teor de umidade ao longo do perfil do latossolo estudado tendo em vista a proposta da metodologia, que era de acompanhamento das alterações do teor de umidade de solo em resposta à elevação da franja capilar. Comparativamente, na figura 5.5 são apresentadas as curvas características de duas amostras de um latossolo vermelho-escuro determinadas por Lima (2002) no intervalo de sucção de 0 a 28.000 kPa, utilizando o método do papel filtro (Houston *et al.*, 1994). Nessa figura, observa-se que teores de umidade por volta de 10 % correspondem a sucções superiores a 12.000 kPa.

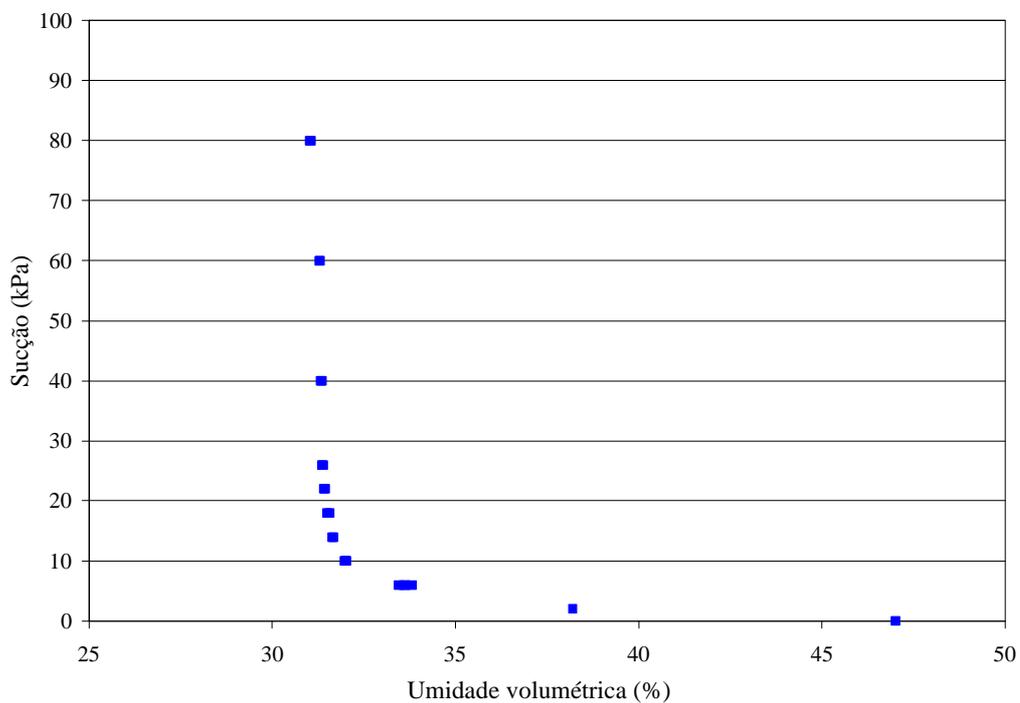


Figura 5.4 - Curva característica do solo estudado

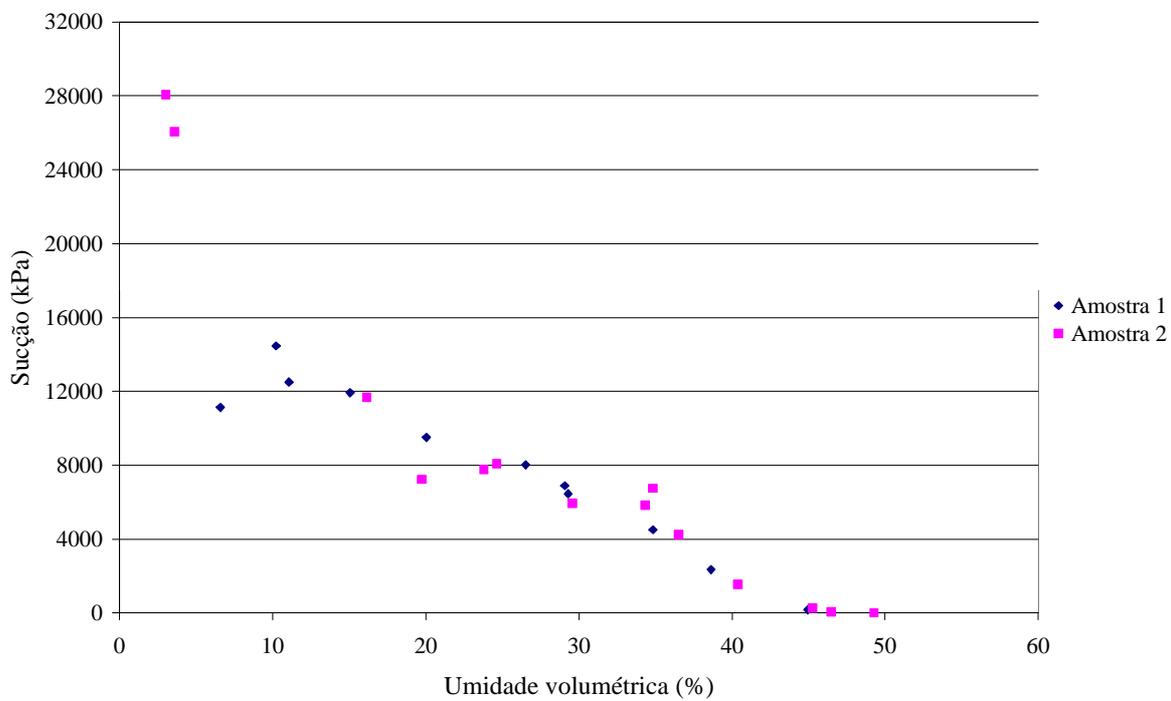


Figura 5.5 - Curvas características obtidas por Lima (2002)

5.1.6. Curva de compactação do solo

A curva de compactação do solo se restringiu ao ramo seco da curva de compactação, já que os solos compactados com umidade abaixo da ótima adquirem um arranjo dos grãos semelhantes aos das estruturas floculadas, sendo que essa estrutura seria tanto mais pronunciada quanto menor fosse a energia de compactação (Vargas, 1978). Por isto, considerando a figura 5.6, optou-se por uma compactação com uma energia baixa de 2,6 kg/cm² (aplicada durante 2 minutos após a estabilização da aplicação em aproximadamente 30 segundos). Da curva de compactação 2,6 kg/cm², observou-se que a umidade para compactação deveria ser de aproximadamente 15 %.

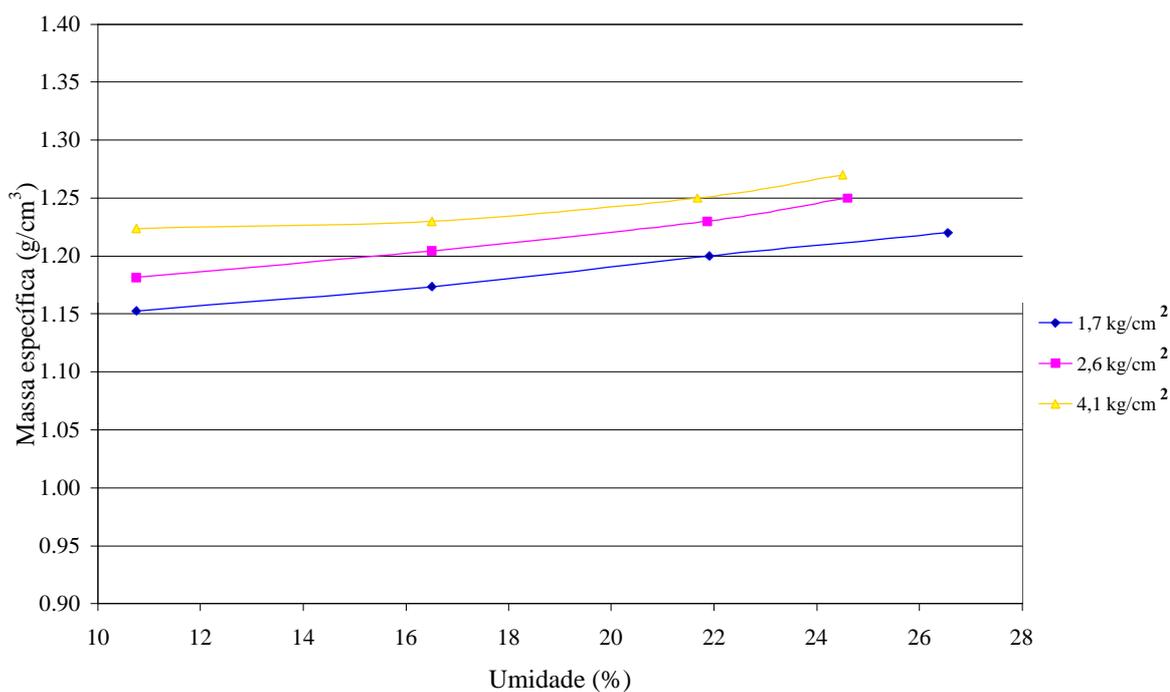


Figura 5.6 - Curva de compactação estática do solo para diferentes pressões

5.2. TESTES PRELIMINARES

5.2.1. Comparação entre os espectros da lâmpada e do Sol e identificação de ruídos

Na figura 5.7 são apresentadas curvas representativas da radiância e da reflectância da placa *spectralon* tendo como fontes de iluminação o Sol e a lâmpada (com ângulo de iluminação de 15°).

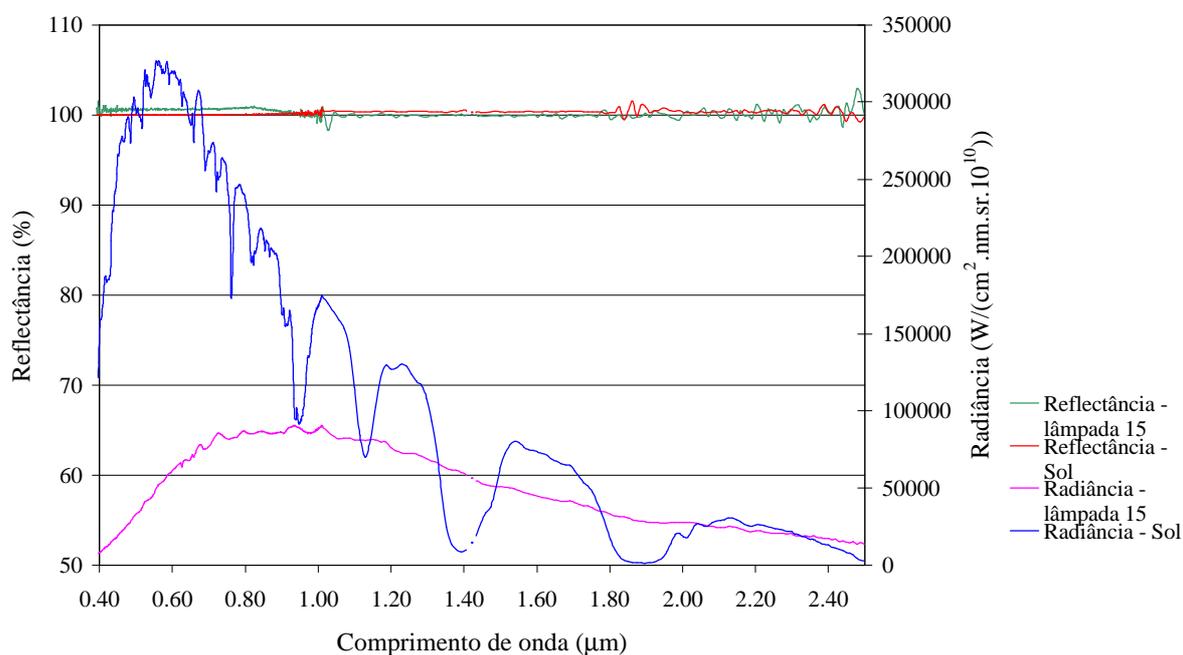


Figura 5.7 - Curvas representativas da radiância e reflectância da placa *spectralon* tendo como fontes de iluminação o Sol e a lâmpada (com ângulo de iluminação de 15°)

A máxima radiância da lâmpada corresponde a 27,81 % da radiância do Sol, porém de acordo com a equação 2.4 (página 9) esperava-se que a máxima radiância ocorresse nos comprimentos de onda 0,48 μm e 0,85 μm. No entanto, os picos foram observados nos comprimentos de onda de 0,56 μm e 1,01 μm, respectivamente para o Sol e para a lâmpada. Quanto à lâmpada, pode-se observar a ocorrência de um intervalo de radiância aproximadamente uniforme entre os comprimentos de onda de 0,70 μm a 1,10 μm, com a ocorrência de pequenos picos isolados, como em 0,94 e 1,01 μm. Portanto, a média da região entre 0,70 μm e 1,10 μm é representativa da máxima radiância emitida pela lâmpada, englobando o comprimento de onda de 0,85 μm. No que se refere ao Sol, a ocorrência de tal

pico poderia estar associada à absorção da radiação eletromagnética pelos componentes da atmosfera.

Ainda na figura 5.7, observam-se oscilações na reflectância da placa *spectralon* utilizada como alvo da radiação emitida tanto pela lâmpada quanto pelo Sol.

No caso da lâmpada, sendo a mesma alimentada diretamente pela tensão da rede pública, suspeitou-se que as variações naturais na rede elétrica poderiam estar contribuindo para a ocorrência de tais oscilações, porém ao se monitorar a tensão na rede elétrica que chegava ao Laboratório de Hidráulica observou-se que as variações eram insignificantes a ponto de provocar tais oscilações (219 V +/- 1V) e, portanto, o emprego de um estabilizador de voltagem não contribuiria para diminuição das mesmas.

As oscilações nos intervalos de comprimentos de onda entre 0,40 μm e 0,50 μm e entre 2,00 μm e 2,50 μm podem ter sido causadas pela diminuição da radiância, inferior a $25.000.10^{-10} \cdot \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$. Tal fato foi observado por Gonçalves (1999), utilizando o espectrorradiômetro GER 2600 em trabalho de campo, nos intervalos de 0,90 a 1,00 μm , 1,35 a 1,45 μm , 1,80 a 2,00 μm e 2,40 a 2,50 μm , a que o autor atribuiu as oscilações como sendo ruídos causados por limitação no desempenho do espectrorradiômetro GER 2600 quando a radiação incidente atingia um determinado nível, especialmente porque esses eram intervalos em que se verificam algumas bandas de absorção de alguns constituintes atmosféricos.

Neste trabalho, apesar dos dados terem sido coletados em laboratório, como não foi adotado controle de temperatura e de umidade do ar os dados obtidos estiveram sujeitos às variações micro-climáticas. Esse fato provavelmente pode ter interferido indiretamente sobre as curvas espectrais, ao alterar as características físicas das colunas de solo, como a umidade do solo próximo à superfície. Quanto às oscilações observadas nas curvas coletadas em laboratório, possivelmente, estiveram mais associadas a outros fatores, como às duas hipóteses que se seguem, do que às alterações na micro-atmosfera.

A primeira hipótese levantada seria a possível característica intrínseca da lâmpada de não emitir radiação eletromagnética constante ao longo do tempo em todos os comprimentos de onda analisados em função do efeito de aquecimento da mesma ao longo do tempo. Essa hipótese foi ratificada por meio da análise das curvas espectrais coletadas ao longo de 20 minutos utilizando como alvo a placa de referência, em que se observou uma amplitude de variação máxima de 1 %. Porém, apesar de não ter sido afastada completamente a

possibilidade de ocorrência desse fato, a adoção de um intervalo de tempo fixo de 2 minutos entre a ligação da lâmpada à rede elétrica e a efetivação da coleta de dados espectrais minimizou essa interferência sobre as curvas espectrais coletadas.

A segunda hipótese levantada estaria associada à radiação difusa proveniente da lona plástica preta, por não ser totalmente fosca, utilizada para recobrimento das cabanas sob as quais foram realizados os ensaios. Além da lona não ser fosca, dadas as dimensões das cabanas, as correntes de vento eventualmente provocavam sua movimentação. Na cabana número 1 (maior) a lona estava mais sujeita a essa situação que a lona da cabana número 2 (menor), porém na cabana número 2 (menor) o equipamento se encontrava mais próximo da lona.

Diante disso, realizou-se uma coleta de dados de reflectância tendo como alvo a placa *spectralon*, porém não utilizando as cabanas de lona plástica preta. Nessa situação, utilizou-se uma cabana alternativa de paredes rijas de papelão, forradas com papel preto totalmente fosco, do tipo camurça, como aparato para impedir interferências de radiação eletromagnética externa.

Na figura 5.8 são apresentadas a curva espectral coletada nessa situação e as curvas espectrais repetidas da figura 5.7 coletadas tendo o Sol e a lâmpada, na cabana de lona plástica preta, como fontes de radiação.

Observa-se na figura 5.8 a diminuição das oscilações da curva espectral coletada utilizando a lâmpada na cabana alternativa em relação à curva espectral coletada utilizando a lâmpada na cabana de lona. Essa diminuição foi expressiva entre os comprimentos de onda de 1,00 μm e 2,00 μm e um pouco menor entre 2,00 μm e 2,50 μm , devido às limitações de sensibilidade do equipamento, conforme comentado anteriormente. Portanto, todas as curvas coletadas nas cabanas de lona foram afetadas pela radiação difusa proveniente de tal material. Porém, apesar da ocorrência de oscilações nas curvas de reflectância, considerando a amplitude restrita dessas oscilações, inferiores a 1% (excluídos os intervalos entre 0,40 μm e 0,50 μm , entre 2,00 μm e 2,50 μm e nas proximidades de 1,00 μm e 1,42 μm), e que foi adotada a mesma lâmpada na obtenção de todos os dados espectrais, relativamente, não haveria interferência de tais oscilações sobre o resultado final.

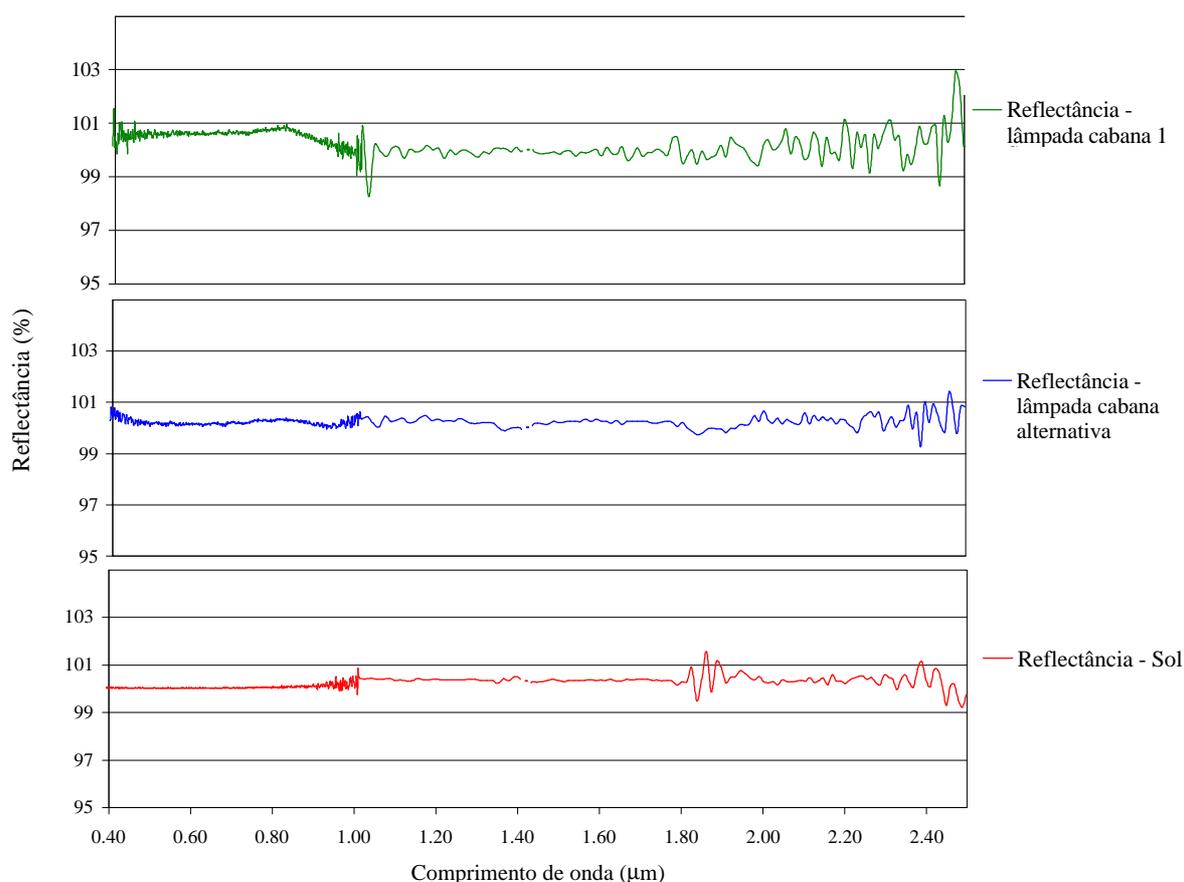


Figura 5.8 - Curvas espectrais da placa *spectralon* coletadas na cabana 1, na cabana alternativa e sob o Sol

Especificamente no comprimento de onda de 1,42 μm , observou-se um comportamento errático em todos os dados de reflectância coletados, alternando aleatoriamente entre absorção da radiação e pico de reflectância, mesmo em curvas coletadas seguidamente, com intervalo de tempo suficiente somente para realização de cada coleta, que era de aproximadamente 10 segundos. Por esse fato, apesar da proximidade com a banda de absorção por vapor de água, atribui-se tal comportamento a um problema no funcionamento do equipamento, e, conseqüentemente, os dados coletados nesse comprimento de onda foram descartados de todas as curvas espectrais.

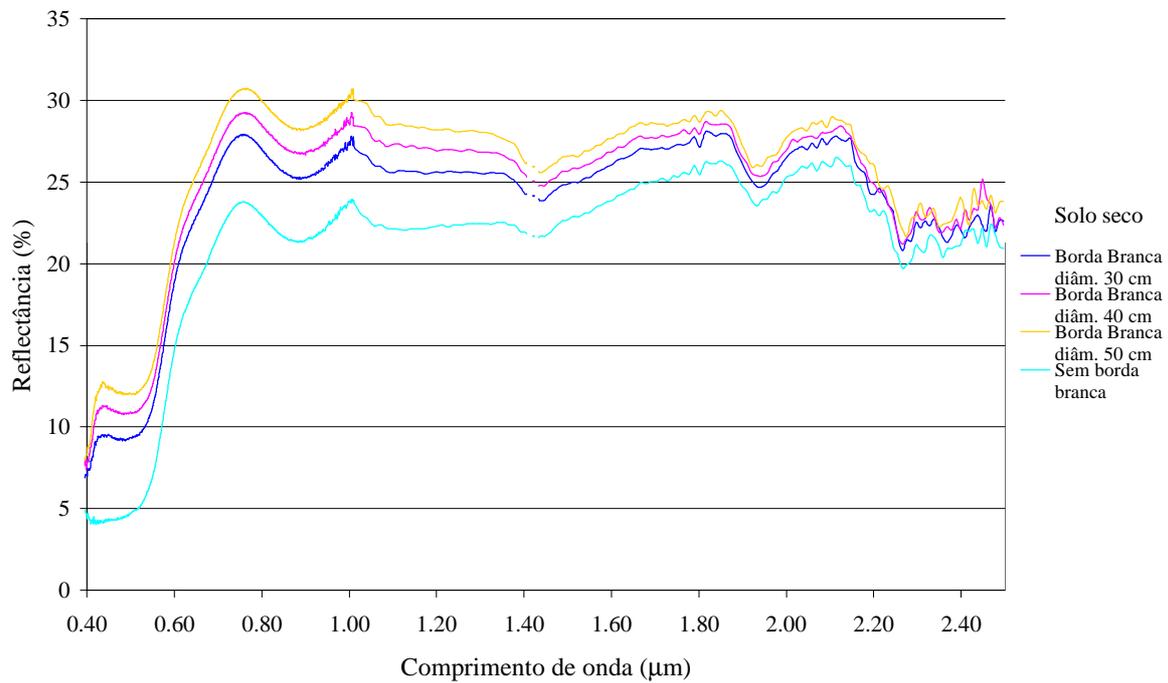
Já nas proximidades do comprimento de onda de 1,00 μm , nas figuras 5.7 e 5.8, é visível a mudança na reflectância da placa *spectralon* causada pela alteração do espectrômetro no espectrorradiômetro (GER, 1998).

Na figura 5.8, ainda, é possível observar que as curvas coletadas tendo a lâmpada como fonte de radiação eletromagnética não coincidem absolutamente e jamais coincidiriam com a curva coletada tendo o Sol como fonte de radiação eletromagnética, isso porque cada uma das duas fontes possui picos e oscilações na emissão de radiação em distintos comprimentos de onda. Porém, como os dados aqui coletados são de fator de reflectância bidirecional e como o principal interesse do trabalho é avaliar a adequação ou não do sensoriamento remoto, sem contudo obter-se modelos matemáticos para aplicação direta, na eventual identificação do teor de umidade em condições de campo, o emprego de uma lâmpada como fonte de radiação eletromagnética certamente é apropriada.

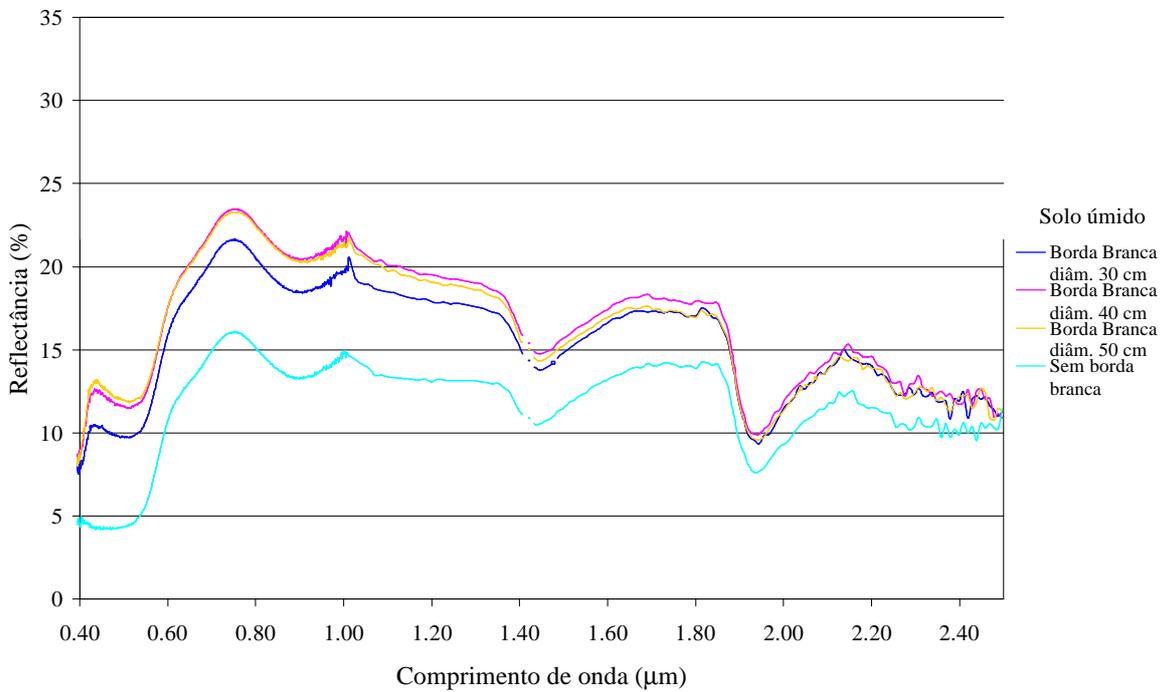
5.2.2. Avaliação dos efeitos de adjacência

Na figura 5.9 (a) são apresentadas as curvas espectrais do solo dito como seco (umidade de 3,5 %) variando-se as superfícies de adjacências dos corpos de prova. Verificou-se que a substituição da borda branca com diâmetro de 50 cm instalada próxima aos corpos de prova por bordas brancas com diâmetros de 40 e 30 cm e, ainda, com a permanência somente do fundo preto acarretaram em diminuições sensíveis na reflectância de 4 %, 11 % e 30 % em relação aos dados coletados com a borda de 50 cm, ou seja, diminuindo-se a borda branca diminuiu-se a reflectância. No entanto, estas reduções foram parcialmente diferentes ao se considerar o solo dito como úmido (umidade de 31,0 %), conforme figura 5.9 (b), com diminuições médias de 5 %, 11 % e 37 % da reflectância dos corpos de prova cilíndricos circundados pelas bordas brancas com 40 e 30 cm e pela borda preta em relação ao corpo de prova circundado pela borda branca com diâmetro de 50 cm, respectivamente. Portanto, apesar de ser esperada maior interferência relativa da borda sobre o comportamento espectral do solo úmido, tal fato não foi consumado, sendo que os resultados indicaram apenas uma tendência de aumento, inclusive com interferências relativas iguais no caso da borda de 30 cm.

Em vista disso, apesar da superfície visada pelo sensor na geometria adotada ter um diâmetro de 3,15 cm, a resposta espectral era função de uma área muito maior, excedendo provavelmente a área quadrada de 30 cm de lado adotada na construção das colunas de solo, porém considerando a escala de execução do trabalho, dimensões maiores seriam executivamente inviáveis.



(a)



(b)

Figura 5.9 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos submetidos a diferentes condições de borda: (a) solo seco e (b) solo úmido

Nas curvas espectrais apresentadas na figura 5.9, observou-se a manifestação de picos de reflectância entre os comprimentos de onda de 0,40 μm e 0,50 μm , além de elevação generalizada da reflectância em até 100 % das curvas coletadas com as bordas brancas em relação às curvas coletadas sem as bordas brancas ao longo dos comprimentos de onda do visível. Tal fato pode ser atribuído à reflectância proveniente dos círculos de papel, conforme verificado na figura 5.10, em que se pode observar, ainda, a ocorrência de reflectância superior a 100 % nas proximidades do pico em discussão. Esse fato pode ser atribuído aos eventuais pigmentos constituintes do papel utilizado, em especial pigmentos azuis, uma vez que esse intervalo corresponde ao intervalo do azul (0,45 a 0,50 μm) no espectro visível. Quanto à magnitude desse pico de reflexão, é necessário lembrar que os dados espectrais coletados são de fator de reflectância, ou seja, utilizam um padrão de referência, nesse caso uma placa spectralon branca, que devido à utilização anterior em diversas pesquisas provavelmente já não possui as características iniciais de sua calibração, incluindo-se eventuais partículas de pó aderidas à sua superfície, que acarretam em minoração das leituras de reflectância realizadas. Porém, apesar de, tanto a placa spectralon quanto os círculos de papel, não se tratarem de superfícies ideais, como os mesmos materiais foram utilizados ao longo desse ensaio e, no caso da placa, nos demais experimentos, os efeitos relativos dessas interferências podem ser desconsiderados.

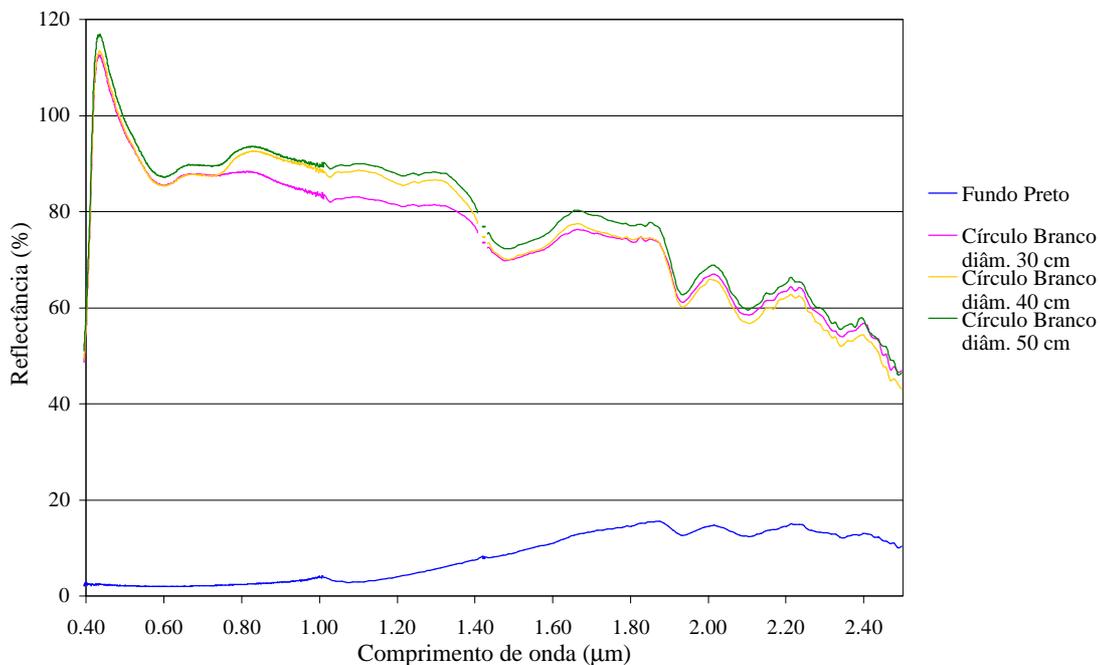


Figura 5.10 – Curvas espectrais dos círculos de papel e do fundo preto utilizados no ensaio para avaliação dos efeitos de adjacência

Quanto ao fundo preto, também se observou não se tratar de uma superfície de referência ideal, uma vez que, ocorreu reflectância da radiação eletromagnética nos comprimentos de onda do visível. Porém, apesar de não se tratar de uma superfície ideal, parte da radiação refletida também deve ser atribuída à cabana onde foram realizados os ensaios, conforme discussão prévia.

As alterações das superfícies de adjacência, apesar de terem provocado elevação da reflectância ao longo de todos os comprimentos de onda, pouco afetaram as alturas e as áreas das bandas de absorção da água nas proximidades dos comprimentos de onda de 1,45 e 1,95 μm .

5.3. ETAPA PRINCIPAL

5.3.1. Ensaios nas colunas de solo

Os ensaios nas colunas de solo foram conduzidos entre os dias 15/09/01 e 28/09/01 na coluna 1 e entre os dias 30/10/01 e 13/11/01 na coluna 2.

Depois de iniciada a fase de molhamento, com o nível de saturação na base da coluna, observou-se que as alturas máximas atingidas pela ascensão capilar chegaram a 72 cm e 94,5 cm, em relação à base, para as colunas 1 e 2, respectivamente. Nessa situação, observou-se uma mudança gradual na cor do solo, associada aos diversos teores de umidade, desde a saturação na base até o teor de umidade em que se encontrava previamente o solo na coluna. A diferença entre os níveis atingidos nas duas colunas pela ascensão capilar esteve, provavelmente, associada a alterações na massa específica causadas pelo folgamento do acrílico frontal em função do aumento da pressão do solo saturado, inclusive com vazamentos de água em diversos pontos junto à base da coluna de solo. Essa situação foi contornada na coluna 1, e prevenida na coluna 2, por meio da instalação de morsas comprimindo o acrílico à estrutura metálica das colunas.

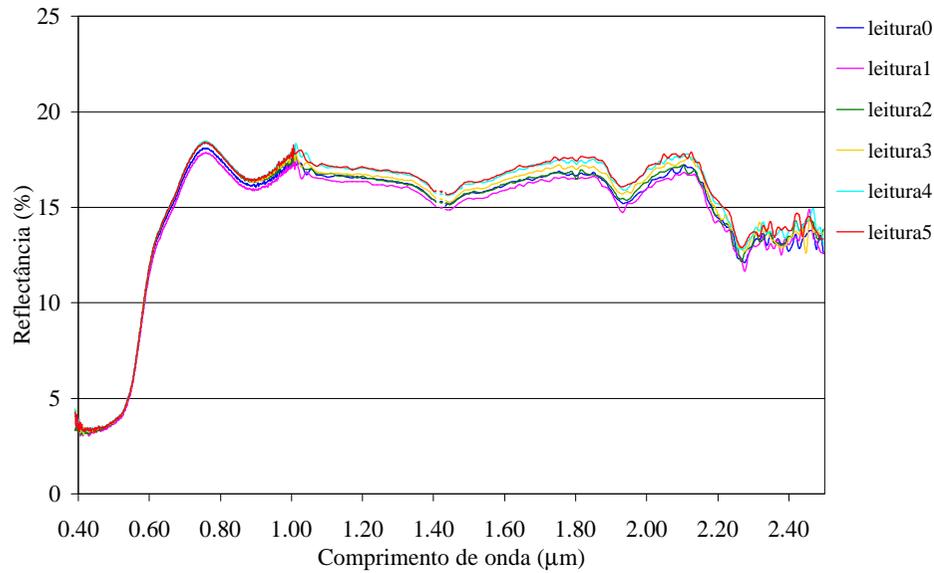
Em seguida, com a elevação do nível de saturação observou-se, através da parede de acrílico, que a mudança de cor do solo se dava em uma interface nítida, portanto,

provavelmente, a frente de alteração da umidade coincidia aproximadamente com a frente de saturação.

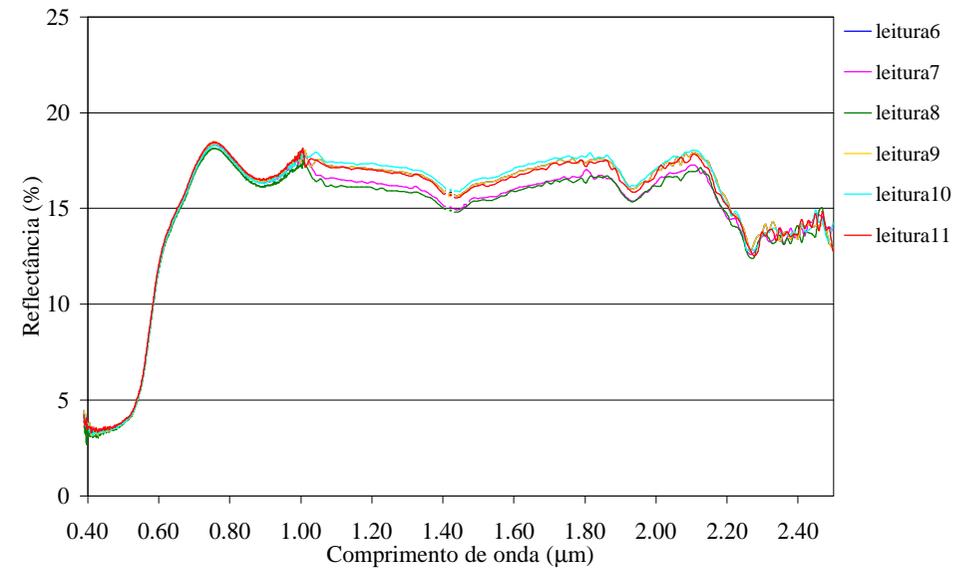
Nas figuras 5.11 e 5.12 e tabelas 5.3 e 5.4 são apresentadas as curvas espectrais e correspondentes alturas da frente úmida em relação à superfície das colunas de solo para as colunas 1 e 2, respectivamente.

Durante a coleta de dados da coluna 1, entre as leituras 17 e 18, a camada de solo correspondente aos primeiros 6 cm foi removida e repostada por solo seco, compactado manualmente, em idênticas condições de umidade a do solo seco que se encontrava na coluna anteriormente, antes da ascensão da frente de saturação. Tal procedimento foi necessário, pois, por dificuldades experimentais, as leituras posteriores à leitura 17 não haviam sido coletadas antes que a frente úmida atingisse a superfície. Após a troca dessa camada, a coleta de dados foi reinicializada e seguiu-se normalmente. No entanto, apesar da troca dessa camada ter alterado a estrutura da coluna de solo, principalmente o arranjo da superfície, não se observou mudanças sensíveis nas curvas espectrais. Provavelmente, as curvas espectrais tenham sido insensíveis à alteração do arranjo superficial por se tratar de solo deformado e peneirado, portanto, com granulometria relativamente uniforme.

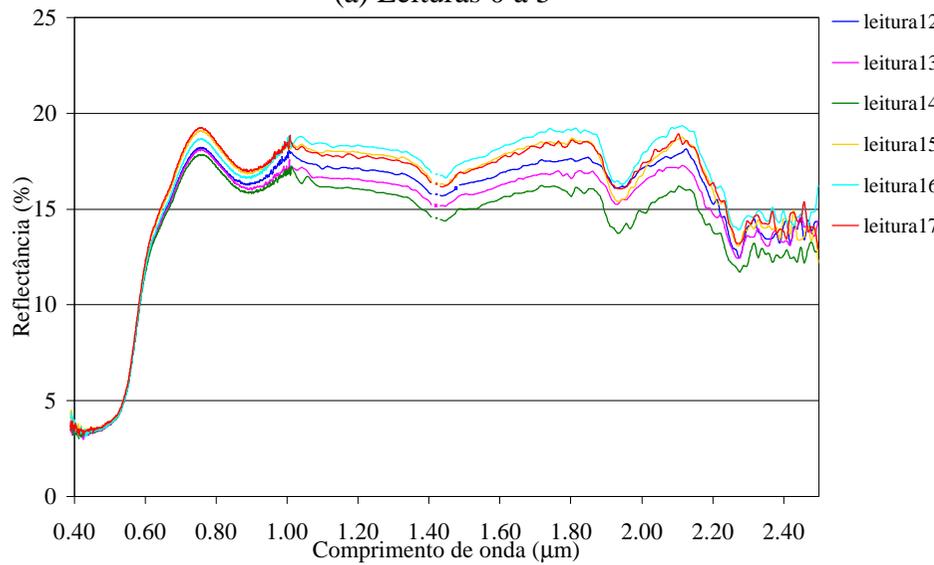
Apesar das estimativas da composição percentual do solo por meio das comparações dos difratogramas não envolver todos os minerais do solo e possuir textura argilosa, em analogia às curvas determinadas por Stoner e Baumgardner (1981), é possível caracterizar as curvas espectrais apresentadas nas figuras 5.11 e 5.12 como sendo afetadas por compostos de ferro. Portanto, condizentes com os difratogramas, em que se identificaram as presenças de hematita e goetita. Esses componentes concorreram para as baixas reflectâncias observadas, que são inferiores a 25 %, mesmo com o solo apresentando baixos teores de umidade.



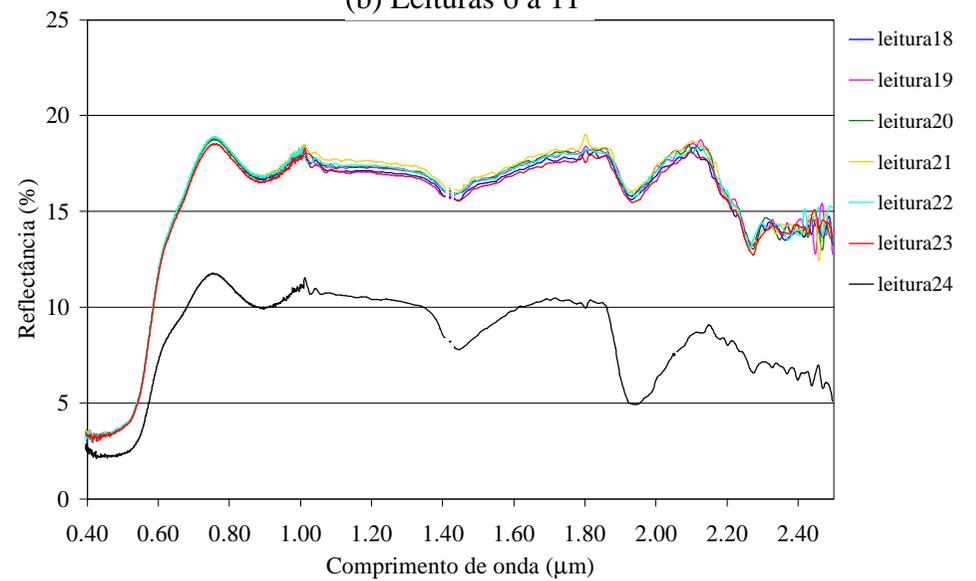
(a) Leituras 0 a 5



(b) Leituras 6 a 11

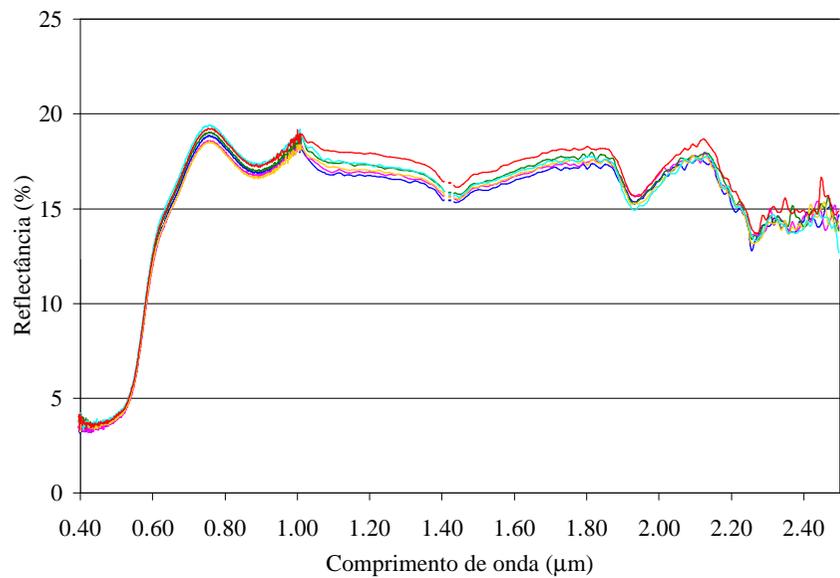


(c) Leituras 12 a 17

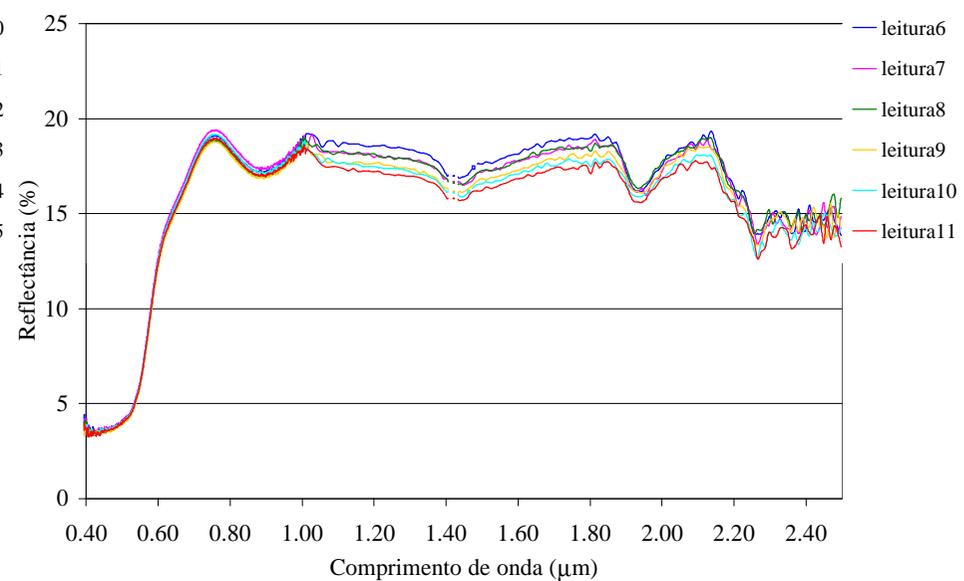


(d) Leituras 18 a 24

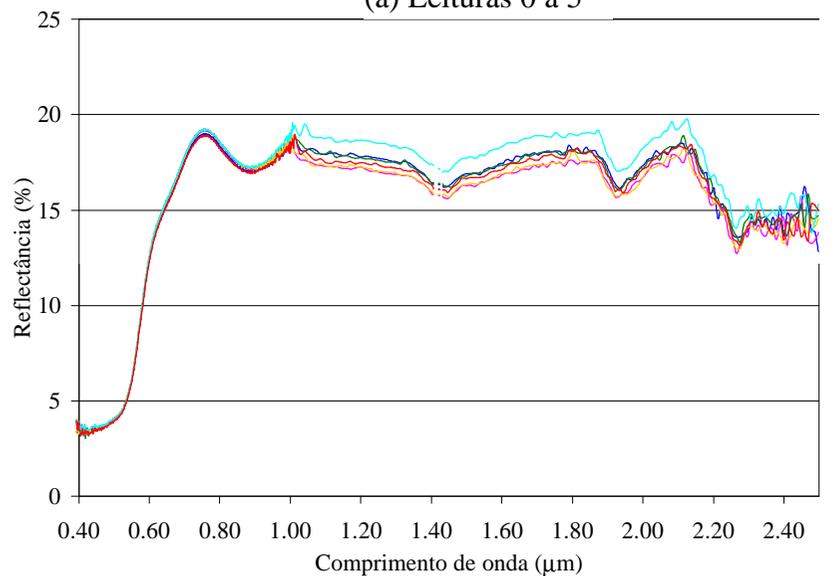
Figura 5.11 - Curvas espectrais da coluna de solo 1 obtidas com a progressiva elevação da frente úmida



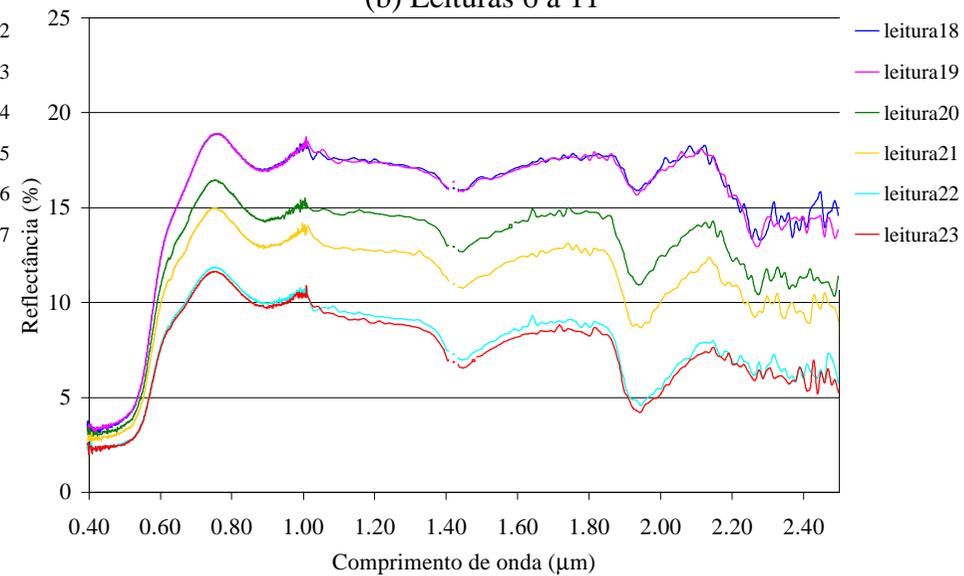
(a) Leituras 0 a 5



(b) Leituras 6 a 11



(c) Leituras 12 a 17



(d) Leituras 18 a 23

Figura 5.12 - Curvas espectrais da coluna de solo 2 obtidas com a progressiva elevação da frente úmida

Tabela 5.3 - Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo na coluna 1

Data / horário	Leitura	Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo (cm)	Data / horário	Leitura	Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo (cm)
15/9/01 8:00	0	150,0	27/9/01 11:48	11	14,0
21/9/01 8:00	1	88,0	27/9/01 12:18	12	12,0
23/9/01 8:00	-	82,0	27/9/01 12:49	13	10,0
24/9/01 8:00	-	79,0	27/9/01 13:04	14	9,0
26/9/01 8:00	-	78,0	27/9/01 13:21	15	8,0
26/9/01 13:00	2	45,0	27/9/01 13:39	16	7,0
26/9/01 18:00	3	43,0	27/9/01 13:59	17	6,0
27/9/01 8:00	-	39,0	28/9/01 14:00	18	5,0
27/9/01 8:56	4	32,0	28/9/01 14:21	19	4,0
27/9/01 9:38	5	27,0	28/9/01 14:44	20	3,0
27/9/01 10:18	6	22,0	28/9/01 14:56	21	2,5
27/9/01 10:35	7	20,0	28/9/01 15:10	21	2,0
27/9/01 10:55	8	18,0	28/9/01 15:40	23	1,0
27/9/01 11:07	9	17,0	28/9/01 16:04	24	0,0
27/9/01 11:34	10	15,0			

Tabela 5.4 - Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo na coluna 2

Data / horário	Leitura	Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo (cm)	Data / horário	Leitura	Profundidade da frente úmida em relação à superfície do solo (cm)
30/10/01 8:00	0	150,0	13/11/01 14:30	8	12,0
31/10/01 9:20	-	102,0	13/11/01 14:52	9	9,0
1/11/01 16:30	-	84,0	13/11/01 15:05	10	7,5
3/11/01 14:00	1	71,0	13/11/01 15:28	11	5,0
4/11/01 8:00	-	68,0	13/11/01 15:35	12	4,2
5/11/01 8:00	-	65,5	13/11/01 15:48	13	3,0
6/11/01 11:00	2	63,5	13/11/01 15:59	14	2,2
7/11/01 9:10	3	58,0	13/11/01 16:09	15	1,5
8/11/01 8:00	-	57,0	13/11/01 16:12	16	1,2
9/11/01 11:10	4	56,0	13/11/01 16:15	17	0,8
10/11/01 8:00	-	55,7	13/11/01 16:17	18	0,6
11/11/01 8:00	-	55,5	13/11/01 16:22	19	0,5
12/11/01 8:00	-	55,5	13/11/01 16:32	20	0,0
13/11/01 9:30	5	55,5	13/11/01 16:34	21	0,0
13/11/01 11:30	6	36,0	13/11/01 17:00	22	0,0
13/11/01 12:20	7	28,0	13/11/01 17:13	23	0,0

Nas curvas espectrais apresentadas ainda são perceptíveis bandas de absorção características de alguns argilominerais, ratificando a difratometria de raios-X (figura 5.2), como a banda de absorção da gibsitita em 2,30 μm (Hunt *et al.*, 1971 *apud* Baptista, 2001) e a banda de absorção devido aos compostos de ferro nas proximidades de 0,90 μm (Stoner *et al.*, 1980a), especificamente da goetita e hematita. Portanto, a resposta espectral desse solo se mostrou insensível aos efeitos da matéria orgânica presente em um teor de 2,7 %, superando os limites estimados por Galvão e Vitorello (1998) como produtores de mascaramento dessas feições. Em outros casos essas bandas não chegam a ser tão claras, como as bandas de absorção da caulinita nos intervalos de 1,40 a 1,41 μm e 2,16 a 2,20 μm (Hunt e Salisbury, 1970 *apud* Galvão *et al.*, 1997), isso porque próximo àquele intervalo ocorreram ruídos com amplitudes consideráveis em 1,42 μm , a que se associou um defeito no espectrorradiômetro, e oscilações neste intervalo. Apesar de Lindberg e Snyder (1972) e Demattê *et al.* (1998) terem verificado que o aumento da umidade no solo acarreta em incremento na amplitude da primeira banda de absorção da caulinita, tal fato não foi observado tendo em vista os problemas citados.

Além disso, pela comparação entre os difratogramas, o quartzo estaria presente no solo em proporção bastante inferior às proporções da caulinita e gibsitita, portanto tendo seu poder de aumentar a reflectância atenuado por outros fatores, como a presença de matéria orgânica e outros compostos opacos também identificados nos difratogramas, por exemplo magnetita e ilmenita, além dos minerais de ferro hematita e goetita (Galvão e Vitorello, 1998 e Demattê e Garcia, 1999), que por limitação quanto à existência prévia de difratogramas padrões no Laboratório de Raios-X, não foram quantificados.

Ainda a partir das figuras 5.11 e 5.12, observou-se que não houve ordenamento, no sentido da diminuição da reflectância com a elevação do nível da frente úmida. Tal ordenamento só ocorreria se efetivamente a interação da radiação eletromagnética no solo fosse função de uma camada de solo com ordem de grandeza de centímetros, ou seja, muito superior às citadas por Meneses (2000a) e Muller e Décamps (2000), com ordem de grandeza de micrômetros.

Além do não ordenamento, verificou-se que o intervalo de variação médio das curvas espectrais, excluindo a curva obtida quando a frente úmida atingiu a superfície do solo, na leitura 24, da coluna 1 e as curvas obtidas quando do atingimento progressivo da frente úmida

na superfície do solo, nas leituras 20, 21, 22 e 23, da coluna 2, chegava a ser de aproximadamente 2 %. A normalização dessas curvas com base na leitura (0), por meio da razão entre cada uma das curvas espectrais e a curva correspondente à leitura (0), não contribuiu para a identificação de uma tendência de ordenamento das mesmas em função da profundidade da frente úmida (figuras 5.13 e 5.14).

O não-controle da umidade relativa do ar no laboratório pode ter contribuído para tal fato, na medida que tais variações de umidade pode ter provocado mudanças na umidade da superfície do solo, como efetivamente verificado nas colunas 1 e 2, que em amostras coletadas nas superfícies das colunas apresentaram umidades de aproximadamente 4,0 % depois de decorrido um mês após o preenchimento com solo com umidade inicial de 15 %. Ademais, a própria utilização da lâmpada pode ter colaborado com a secagem progressiva do solo alternada por eventual umedecimento em função do aumento da umidade relativa do ar.

A possibilidade de que as oscilações na fonte de tensão pudessem ter sido determinantes no não-ordenamento das curvas espectrais foi descartada, dadas as restritas variações observadas na fonte de tensão. Porém, não se pode rejeitar de forma veemente uma possível contribuição dessas variações sobre as oscilações na radiação emitida pela lâmpada e, conseqüentemente, sobre o sinal captado pelo sensor.

Ademais, eventualmente, o movimento da lona plástica da cabana onde foram coletados os dados pode ter contribuído para as oscilações no sinal detectado pelo sensor, visto que, tais leituras correspondem à excitância proveniente da área visada pelo sensor, incluindo suas adjacências, e a radiância que sequer alcançou o solo proveniente do espalhamento da radiação eletromagnética. Inclui-se, ainda, a possibilidade da radiação que atingiu a lona ter refletido na direção do sensor e, em menor proporção, considerando as precauções tomadas, a radiação que atingiu o próprio operador do equipamento. Como comentado, tal hipótese foi confirmada anteriormente, por meio da comparação entre curvas espectrais coletadas na cabana de lona e dados coletados na cabana alternativa, como determinante das oscilações observadas nas curvas espectrais entre 1,00 μm e 2,00 μm , além de contribuir para as oscilações observadas entre 2,00 μm e 2,50 μm , conforme apresentado na figura 5.8.

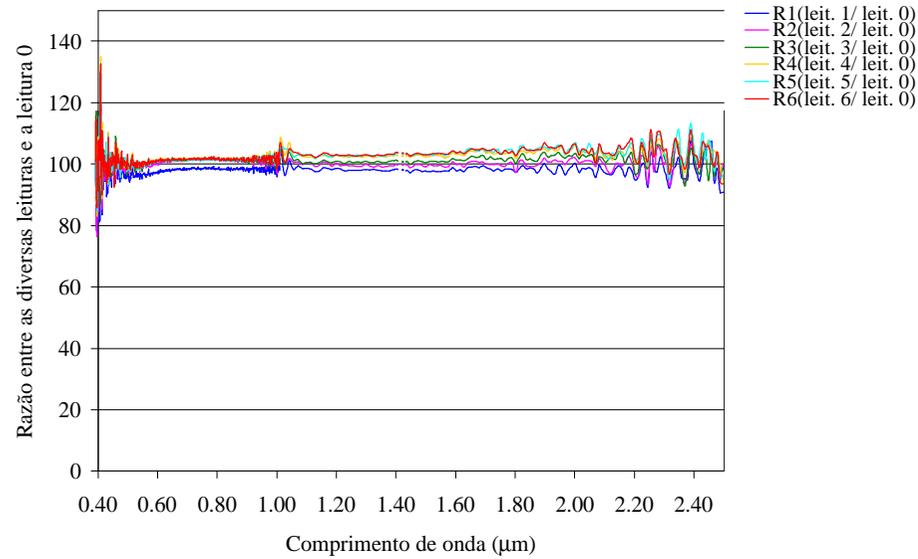
Além do formato das curvas espectrais, foram avaliadas as influências da altura da frente úmida sobre as bandas de absorção da água nas proximidades de 1,45 μm e 1,95 μm ,

conforme apresentado na tabela 5.5, especificamente sobre a área e a altura das bandas de absorção. No entanto, não se observaram alterações sensíveis nas áreas e nas alturas das bandas de absorção da água próximas aos comprimentos de onda de 1,45 μm e 1,95 μm , exceto nas leituras 24 da coluna 1 e 20, 21, 22 e 23 da coluna 2, correspondente ao atingimento progressivo da frente de umidade na superfície das colunas de solo. Essa situação também pode ser observada nas curvas espectrais normalizadas, apresentadas nas figuras 5.13 e 5.14, em que se verificou o desaparecimento dessas bandas de absorção após o processo de normalização com base na leitura (0), exceto nas leituras 24 da coluna 1 e 20, 21, 22 e 23 da coluna 2.

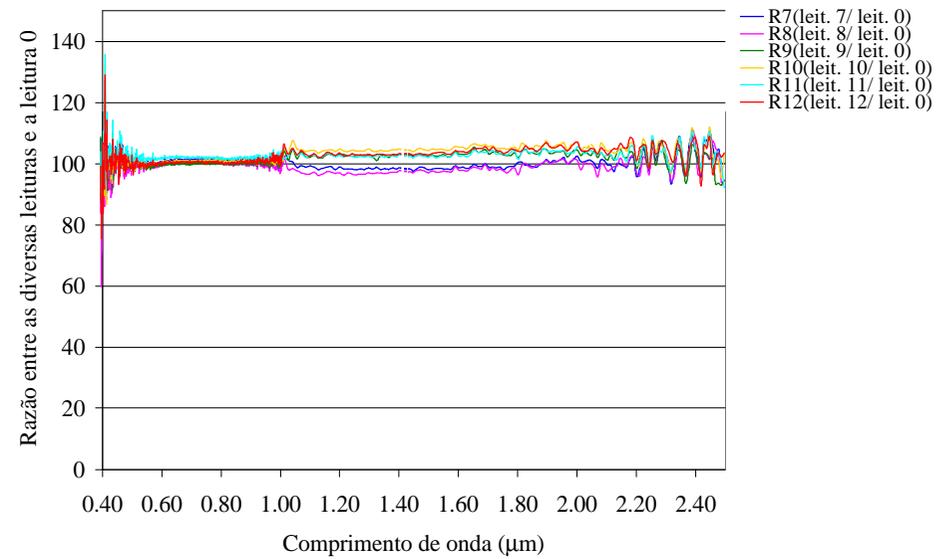
Portanto, apesar das oscilações observadas e do não controle da temperatura e umidade relativa do ar, a amplitude de variação, relativamente restrita, da resposta espectral em função da elevação do nível de saturação do solo concorre para rejeição da hipótese inicial de monitoramento do teor de umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas, portanto não corroborando com as proposições de Idso *et al.* (1975), Epiphonio e Formaggio (1982) e Hatanaka *et al.* (1995), mas, ao contrário, como as alterações sensíveis na reflectância somente foram observadas quando a água atingiu a superfície do solo, concorre para a confirmação do postulado por Meneses (2000a) e Muller e Décamps (2000) de que a radiação eletromagnética interage somente com uma finíssima camada do solo. Por conseguinte, os resultados indicam que a estimativa de umidade no perfil do solo em uma camada com ordem de grandeza de centímetros, utilizando espectrorradiometria no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas, é inviável e que possivelmente as correlações obtidas por Idso *et al.* (1975), Epiphonio e Formaggio (1982) e Hatanaka *et al.* (1995) estavam muito mais relacionadas às características de uniformidade dos solos estudados e às metodologias adotadas, que à efetiva interação da radiação eletromagnética nessas camadas de solo.

Tabela 5.5 – Áreas e alturas das bandas de absorção da água próximas a 1,45 e 1,95 μm

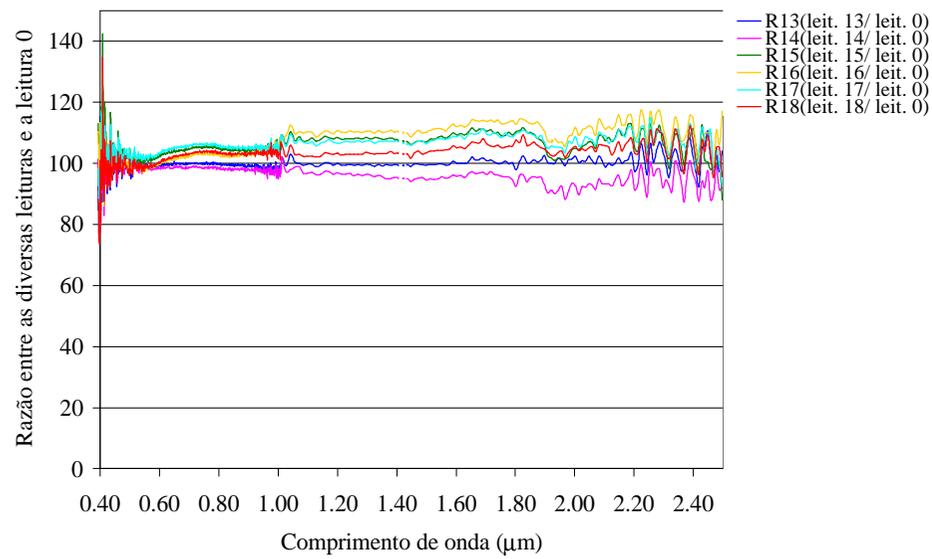
Leit.	Coluna 1				Coluna 2			
	Banda de absorção próxima a 1,45 μm		Banda de absorção próxima a 1,95 μm		Banda de absorção próxima a 1,45 μm		Banda de absorção próxima a 1,95 μm	
	Área da banda ($\mu\text{m}.\%$)	Alt. da banda (μm)	Área da banda ($\mu\text{m}.\%$)	Alt. da banda (μm)	Área da banda ($\mu\text{m}.\%$)	Alt. da banda (μm)	Área da banda ($\mu\text{m}.\%$)	Alt. da banda (μm)
0	0,14	0,86	0,09	1,59	0,10	0,95	0,11	2,00
1	0,10	0,94	0,07	1,88	0,10	0,97	0,12	1,96
2	0,10	0,89	0,05	1,25	0,12	1,02	0,19	2,53
3	0,10	0,97	0,08	1,42	0,17	1,05	0,20	2,28
4	0,10	0,94	0,06	1,60	0,15	1,23	0,21	2,71
5	0,10	0,88	0,03	1,56	0,15	1,17	0,23	2,50
6	0,10	0,90	0,08	1,56	0,15	1,17	0,20	2,84
7	0,10	0,95	0,10	1,32	0,16	1,09	0,21	2,44
8	0,09	0,79	0,15	1,25	0,13	1,02	0,15	2,21
9	0,10	0,94	0,14	1,60	0,13	0,90	0,17	2,13
10	0,11	0,94	0,11	1,44	0,14	1,06	0,12	1,96
11	0,10	0,91	0,12	1,58	0,10	0,96	0,11	2,11
12	0,10	0,91	0,15	1,58	0,10	1,02	0,08	1,94
13	0,11	0,88	0,15	1,61	0,14	1,08	0,07	1,82
14	0,12	1,07	0,23	2,32	0,19	0,96	0,12	2,11
15	0,15	1,20	0,33	3,15	0,19	0,98	0,12	1,85
16	0,18	1,18	0,31	2,57	0,16	1,06	0,18	2,04
17	0,12	1,13	0,25	2,42	0,19	1,12	0,19	1,92
18	0,15	1,14	0,21	2,23	0,13	0,91	0,20	1,79
19	0,13	0,92	0,28	2,29	0,18	0,95	0,22	1,85
20	0,12	0,95	0,26	2,49	0,14	1,48	0,47	3,57
21	0,13	1,10	0,23	2,25	0,21	1,59	0,50	3,71
22	0,13	0,96	0,19	2,03	0,18	1,80	0,56	3,82
23	0,13	0,98	0,24	2,42	0,26	1,88	0,57	3,98
24	0,22	2,13	0,75	5,27				



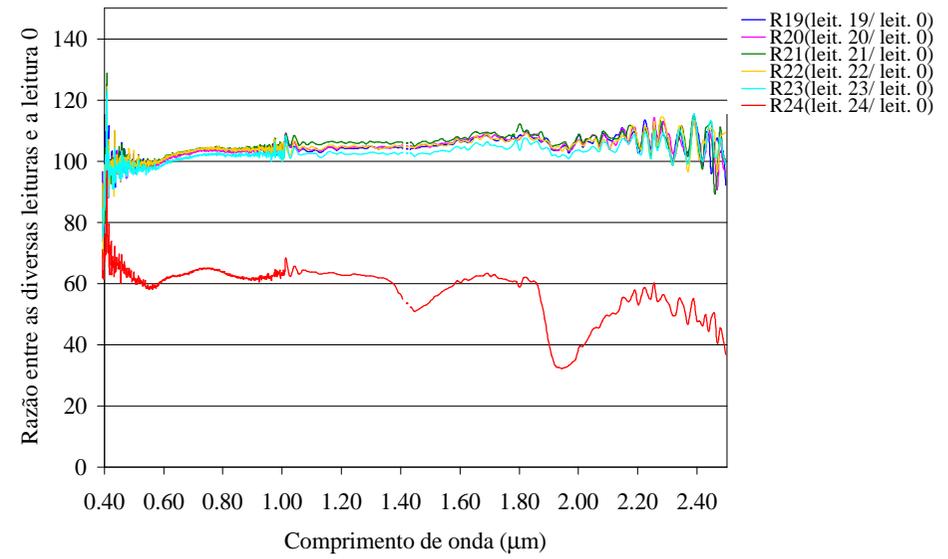
(a) Leituras normalizadas 1 a 6



(a) Leituras normalizadas 7 a 12

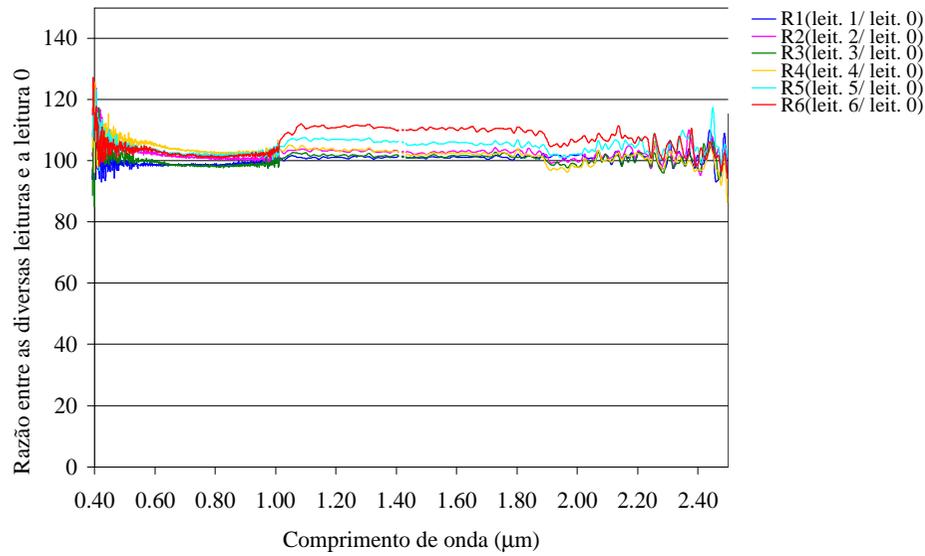


(c) Leituras normalizadas 13 a 18

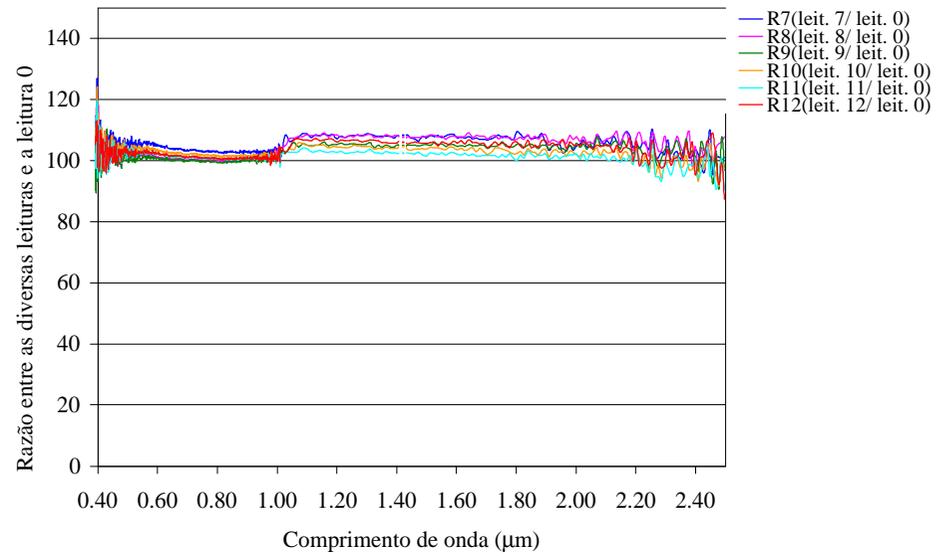


(d) Leituras normalizadas 19 a 24

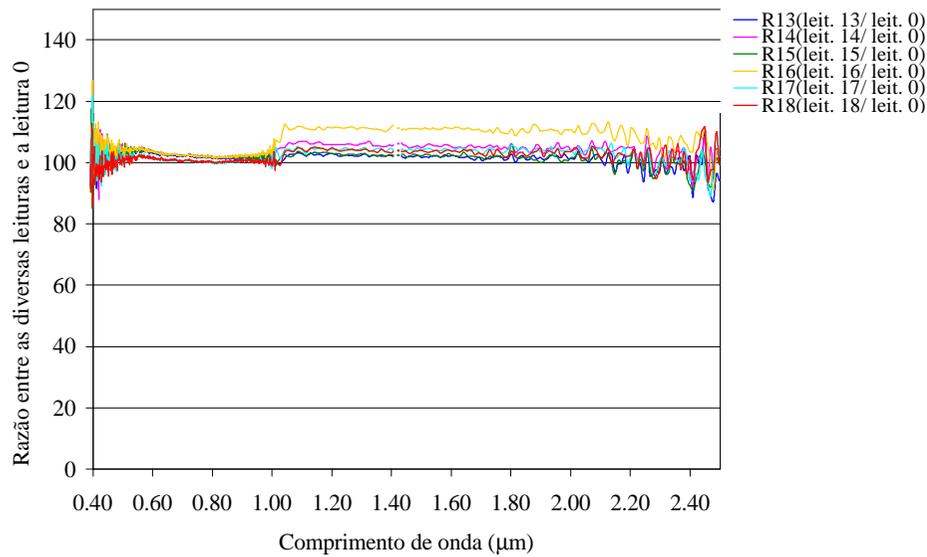
Figura 5.13 - Curvas espectrais normalizadas em função da leitura (0) - coluna 1



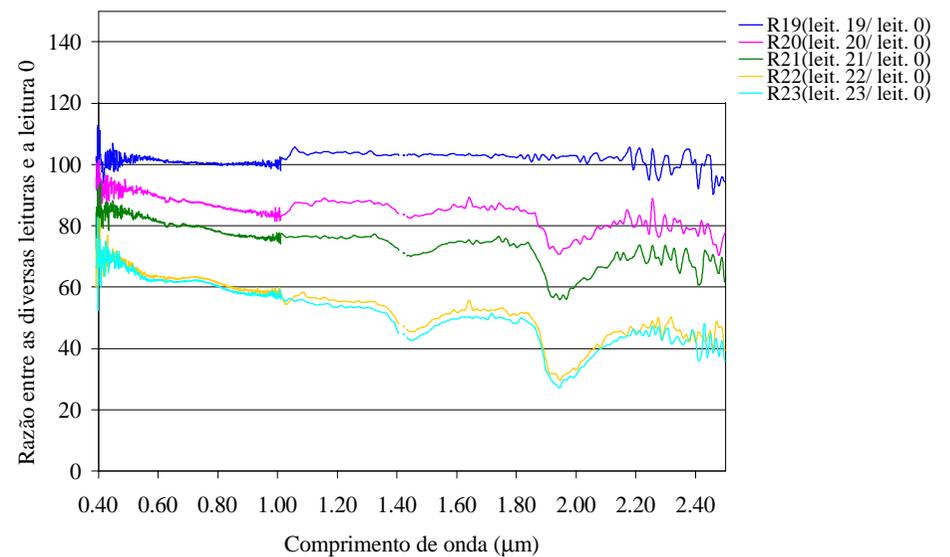
(a) Leituras normalizadas 1 a 6



(b) Leituras normalizadas 7 a 12



(c) Leituras normalizadas 13 a 18



(d) Leituras normalizadas 19 a 23

Figura 5.14 - Curvas espectrais normalizadas em função da leitura (0) - coluna 2

5.3.2. Corpos de prova cilíndricos

Nas figuras 5.15 e 5.16 são apresentadas as curvas espectrais médias correspondentes aos corpos de prova cilíndricos e a normalização dessas curvas em função da leitura coletada com solo seco com profundidade de 10 cm, respectivamente, nas quais se podem observar claramente as curvas referentes ao corpo de prova completamente seco (seco prof. 10,0 cm) e completamente úmido (seco prof. 0,0 cm). A nomenclatura aqui adotada como solo seco corresponde a uma umidade de 3,5 % e o solo dito úmido corresponde a uma umidade de 31,0 %. Apesar disso, também não houve ordenamento entre as curvas em função da espessura da camada inferior de solo úmido, mesmo não havendo as interferências, dado o restrito intervalo de tempo das coletas de dados, que pudessem ser atribuídas ao não controle da temperatura e umidade relativa do ar no ambiente de trabalho. No que se refere à área e altura das bandas de absorção da água nas proximidades de 1,45 e 1,95 μm , também não se verificou alterações sensíveis das mesmas em função da profundidade do solo úmido, exceto para a curva correspondente ao corpo de prova completamente preenchido por solo úmido, ou seja, a curva “Seco prof. 0,0 cm”. Portanto, os resultados obtidos nesse ensaio ratificam as conclusões obtidas a partir dos ensaios nas colunas de solo.

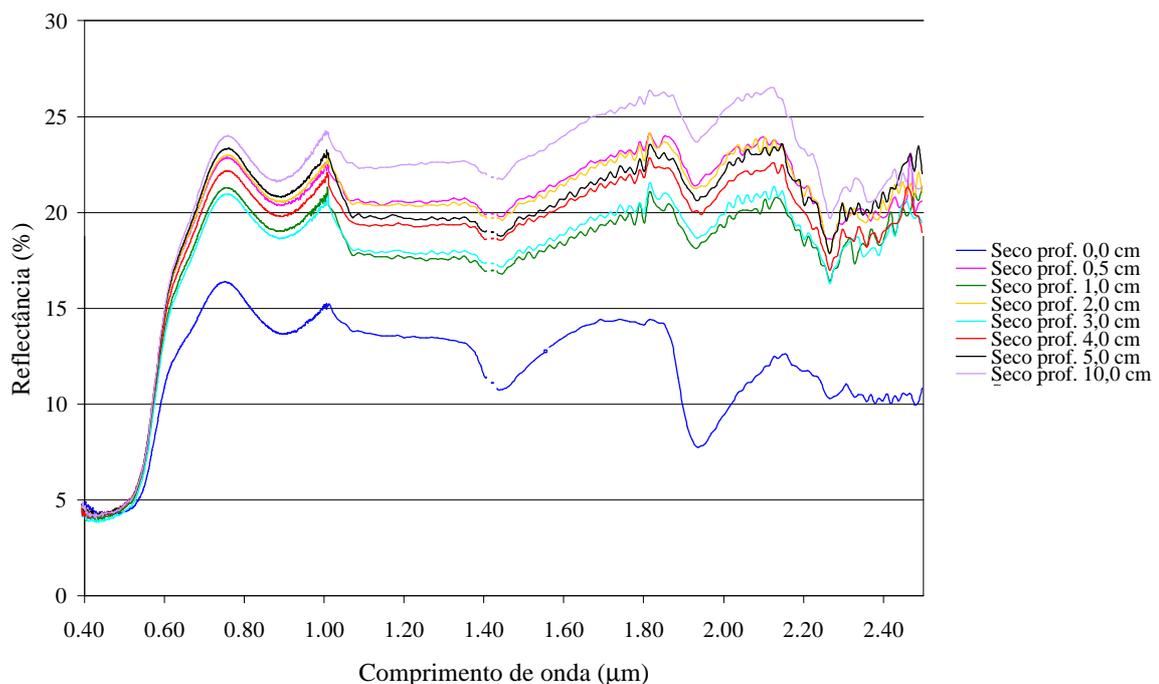


Figura 5.15 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos

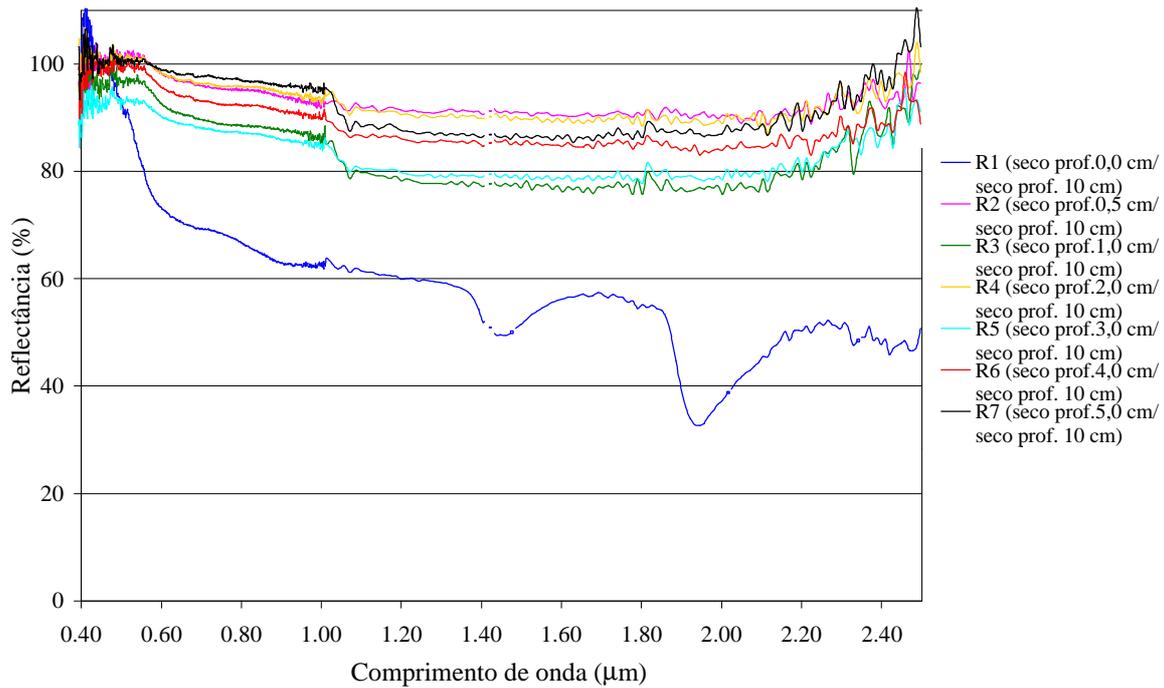


Figura 5.16 - Curvas espectrais dos corpos de prova cilíndricos normalizadas

Ainda nas curvas constantes da figura 5.15, de um modo geral, observa-se um aumento progressivo da reflectância entre os comprimentos de onda de 1,20 e 2,20 μm , excetuando-se as bandas de absorção da água, traduzidas nas curvas da figura 5.16 como a região de mínimo de uma parábola. Tal fato não é verificado nas curvas espectrais coletadas nas colunas 1 e 2 (figuras 5.11 e 5.12), em que se observa uma tendência de constância da reflectância nesse intervalo. Por outro lado, na curva espectral de referência do fundo preto utilizado nas coletas de dados dos corpos de prova cilíndricos, constante da figura 5.10, ocorre fato similar, ou seja, aumento da reflectância com o aumento dos comprimentos de onda a partir de 1,20 μm , portanto, as diferenças observadas nas tendências das curvas espectrais coletadas nos corpos de prova cilíndricos e nas colunas de solo são resultantes das interferências advindas das adjacências, tendo sido, provavelmente, minimizado esse fato nas colunas de solo, em relação aos corpos de prova cilíndricos, devido ao tamanho da área de cada coluna de solo.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho se propôs avaliar a possibilidade do emprego de dados de reflectância espectral no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas como uma ferramenta para estimativa da umidade no perfil do solo e, secundariamente, a analisar as relações entre o comportamento espectral do solo e seus principais fatores determinantes. Para tanto, após a montagem de duas colunas de latossolo vermelho-escuro no Laboratório de Hidráulica da UnB, coletaram-se dados de espectrorradiometria, com o espectrorradiômetro GER 2600, simultaneamente ao processo de umedecimento das colunas. O umedecimento foi efetuado no sentido das camadas inferiores para as camadas superiores, até que a frente úmida atingisse a superfície. Utilizou-se, como fonte de radiação eletromagnética, uma lâmpada halógena com 1.000 W de potência e temperatura nominal de funcionamento de 3.400 K.

Nas curvas espectrais coletadas, verificou-se a ocorrência de oscilações e que a amplitude de variação da resposta espectral entre as curvas coletadas com o solo totalmente seco, correspondendo a uma camada de 150 cm, e com a frente úmida próxima à superfície, ou seja, com a camada de solo seco inferior a 1 cm, foi de cerca de 2 %. Contudo, não se observou o ordenamento das mesmas no sentido de rebaixamento das curvas espectrais, em função da posição do solo úmido.

Apesar de não ter sido descartada a hipótese de possíveis variações na tensão da rede elétrica ter acarretado oscilações na radiação eletromagnética emitida pela lâmpada, pode-se supor que a ordem de grandeza dessa interferência tenha sido muito pequena em relação às demais, visto que se constatou que a variação de tensão da rede era de 219 V + / - 1 V.

Por outro lado, verificou-se que o recobrimento das cabanas de leitura por lonas plásticas contribuiu expressivamente para o surgimento dessas oscilações. No entanto, como todas as leituras foram executadas sob as mesmas condições e como a amplitude dessas oscilações se restringiu a 1 %, de modo geral não afetaram o resultado final.

Apesar dos ensaios terem sido realizados em laboratório, não houve controle de temperatura e umidade do ar. Tal situação sujeitou o experimento às condições microclimáticas. No entanto, talvez o maior impacto dessa situação sobre os resultados tenha sido a sujeição das colunas de solo a ciclos de umedecimento e secagem, provocados pelas alterações da umidade relativa do ar e aquecimento provocado pelo uso da lâmpada,

respectivamente. Tal fato certamente contribuiu para o não ordenamento das curvas espectrais.

O latossolo vermelho-escuro, ainda que seco, apresenta baixas reflectâncias. Por essa característica intrínseca, ainda que se averiguasse redução na reflectância do solo com as mudanças no teor de umidade de camadas subsuperficiais, essas se restringiriam a uma pequena amplitude. A esse fato soma-se, ainda, o efeito da matéria orgânica, que também contribui para a redução da reflectância e, conseqüentemente, para a redução da suposta amplitude de variação da reflectância em função da distância da camada saturada à superfície.

Além disso, a alteração do teor de umidade ao longo do perfil do solo não provocou alterações nas áreas e alturas das bandas de absorção da água próximas a 1,45 e 1,95 μm .

Portanto, a análise dos dados coletados na coluna de solos, juntamente com outros dados auxiliares, indica que o sensoriamento remoto, por meio da reflectância espectral, não se aplica como uma ferramenta para estimativa do teor de umidade no perfil do solo, isso porque não foram observadas alterações sensíveis sobre o comportamento espectral do solo em resposta à elevação da frente de saturação.

Especificamente sobre a identificação de alguns minerais do solo, como gipsita, goetita e hematita, ratificou-se a possibilidade de emprego das curvas espectrais para tal fim. Porém, como a resposta espectral é função simultaneamente de diversas variáveis, acarretando em efeitos sobrepostos, verificou-se que nem todos os compostos identificados por meio de difratometria foram identificados nas curvas espectrais. Portanto, no emprego de sensoriamento remoto para avaliação da composição do solo é necessário a eleição de compostos com distintas manifestações independentes sobre a resposta espectral. Nesta situação, as principais dificuldades seriam observadas com solos que apresentem compostos opacos, como a matéria orgânica, como é o caso do latossolo vermelho-escuro. Nesse caso, apesar da umidade do solo contribuir na identificação de alguns compostos, como caulinita (Lindberg e Snyder, 1972 e Demattê *et al.*, 1998), é recomendável a obtenção de curvas espectrais com o solo seco. Além disso, deve-se ter cautela na análise das curvas espectrais para evitar que ruídos aleatórios sejam confundidos com bandas de absorção.

A título de contribuições na eventual consecução de trabalhos similares, a partir da revisão da metodologia e dos procedimentos adotados, considerando os resultados obtidos e as discussões pertinentes, são sugeridos alguns ajustes nos procedimentos, tais como controle

da umidade e temperatura do ambiente de trabalho; recobrimento da área de trabalho com material preto fosco, completamente fixo, ou, simplesmente, manter paredes pintadas de preto impedindo a entrada de radiação proveniente de outras fontes externas ao experimento e espalhamento da radiação eletromagnética monitorada e a utilização de equipamentos sensíveis à variação de umidade do solo, de acordo com as características do solo a ser estudado, mais especificamente da curva de potencial matricial. E, por fim, no caso de se optar pela metodologia desenvolvida neste trabalho, recomenda-se o estudo em diferentes tipos de solo, principalmente em solos que apresentem altas reflectâncias quando secos, como solos arenosos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 13p.
- ABNT (1986). *NBR 6457: Amostras de Solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 9p.
- ABNT (1987). *NBR 9813. Solo - Determinação da Massa Específica Aparente in Situ, com Emprego de Cilindro de Cravação*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil, 6p.
- Accioly, L. J. O. e Huete, A. R. (2000). “Resposta espectral de solos em razão do ângulo de visada, da umidade e da rugosidade superficial”. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **12**, 2473-2484.
- ASTM (1994). ASTM D 3404-91. “Standard guide for measuring matric potential in the vadose zone using tensiometers.” In: *ASTM Standards on Ground Water and Vadose Zone Investigations*. EUA, American Society for Testing and Materials, 122-131.
- Avery, T. E. e Berlin, G. L. (1992). *Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation*. EUA, Ed. Macmillan, 5ª ed. 471p.
- Baptista, G. M. M. (2001). *Mapeamento e Quantificação da Relação Mineralógica Caulinita/(Caulinita+Gibbsita) de Solos Tropicais, por meio dos Dados do Sensor Hiperespectral AVIRIS (JPL/NASA)*. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília-DF, 139p.
- Baumgardner, M. F.; Silva, L. F.; Biehl, L. L. e Stoner, E. R. (1985). “Reflectance properties of soils.” *Advances in Agronomy*, **38**, 1-44.
- Bedidi, A.; Cerville, B.; Madeira, J. e Pouget, M. (1992). “Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils.” *Soil Science*, **153** (2), 129-141.
- Beck, R. H., Robinson, B. F., McFee, W. W. e Peterson, J. B. (1976). *Spectral characteristics of soils related to the interaction of soil moisture, organic carbon and clay content*. EUA, Laboratory for Applications of Remote Sensing - Purdue University, LARS Information Note 081176.
- Born, M. e Wolf, E. (1999). *Principles of Optics*. EUA, Cambridge University Press, 7ª ed., 952p.
- Bowers, S. A. e Hanks, R. J. (1965). “Reflection of radiant energy from soils.” *Soil Science*, **100** (2), 130-138.
- Bruce, R. R. e Luxmoore, R. J. (1986). “Water retention: field methods”. In: Klute, A. (ed.) (1986). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. EUA, S. S. S. A., 2ª ed., 1188p.
- Charbeneau, R. J. e Daniel, D. E. (1993) “Contaminant transport in unsaturated flow”. In: Maidment, D. R. (ed.) (1993). *Handbook of Hydrology*. EUA, McGraw-Hill.
- Cierniewski, J. (1987). “A model for soil surface roughness influence on the spectral response of bare soils in the visible and near-infrared range”. *Remote Sensing of Environment*, **23**, 97-115.
- Coleman, T. L. e Montgomery, O. L. (1987). “Soil moisture, organic matter, and iron content effect on the spectral characteristics of selected Vertisols and Alfisols in Alabama.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **53** (12), 1659-1663.
- Courault, D.; Bertuzzi, P. e Girard, M.-C. (1993). “Monitoring surface changes of bare soils due to slaking using spectral measurements.” *Soil Science Society of America Journal*, **57** (6), 1595-1601.
- Demattê, J. A. M. e Garcia, G. J. (1999). “Alteration of soil properties through a weathering sequence as evaluated by spectral reflectance.” *Soil Science Society of America Journal*, **63** (2), 327-342.

- Demattê, J. A. M.; Sousa, A. A. e Nann, M. R. (1998). "Avaliação espectral de amostras de solos e argilo-minerais em função de diferentes níveis de hidratação." *Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos-SP, Brasil.
- Embrapa (1978). *Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Distrito Federal*. Rio de Janeiro-RJ, Boletim Técnico nº 53, SNLCS, 455p.
- DPI (2002). "Espectro eletromagnético". URL Internet (www.dpi.inpe.br/spring/usuario/sensorr.htm#espectro em 24/01/2002).
- Engman, E. T. (1991). "Applications of microwave remote sensing of soil moisture for water resources and agriculture". *Remote Sensing of Environment*, **25**, 213-226.
- Engman, E. T. (1997). "Soil moisture: the hydrologic interface between surface and ground waters." *Remote Sensing and Geographic Information Systems for Design and Operation of Water Resources Systems*, IAHS Publ. nº 242.
- Epiphânio, J. C. N. e Formaggio, A. R. (1982). "Estudo de umidade do solo através de dados de reflectância." *Anais do II Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 269-284, Brasília-DF, Brasil.
- Epiphânio, J. C. N.; Formaggio, A. R.; Valeriano, M. M. e Oliveira, J. B. (1992). *Comportamento espectral dos solos do Estado de São Paulo*. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos-SP, 132 p.
- Formaggio, A. R.; Epiphânio, J. C. N.; Valeriano, M. M. e Oliveira, J. B. (1996). "Comportamento espectral (450-2450 nm) de solos tropicais de São Paulo." *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, **20** (3), 467-474.
- Galvão, L. S. e Vitorello, I. (1998). "Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils." *International Journal of Remote Sensing*, **19** (10), 1969-1979.
- Galvão, L. S.; Vitorello, I. e Formaggio, A. R. (1997). "Relationships of spectral reflectance and color among surface and subsurface horizons of tropical soil profiles." *Remote Sensing of Environment*, **61** (1), 24-33.
- Gardner, W. H. (1986). "Water content". In: Klute, A. (ed.) (1986). *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*. EUA, S. S. S. A., 2ª ed., 1188p.
- GER (Geophysical & Environmental Research Corporation) (1998). *GER 2600 Spectroradiometer, User Manual*. Versão 2.1.
- Gomes, C. B. (1984). *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia*. São Paulo-SP, Edgard Blücher, 45 p.
- Gonçalves, L. L. (1999). *Influência da Umidade do Solo na Resposta Espectral de Solo Exposto Via Espectrorradiometria de Campo*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil, Brasília. DF, 109p.
- Hatanaka, T.; Nishimune, A.; Nira, R. e Fukuhara, M. (1995). "Estimation of available moisture holding capacity of upland soils using Landsat TM data." *Soil Science Plant Nutrient*, **41** (3), 577-586.
- Henderson, T. L.; Baumgardner, M. F.; Franzmeier, D. P.; Storr, D. E. e Coster, D. C. (1992). "High dimensional reflectance analysis of soil organic matter." *Soil Science Society of America Journal*, **56** (3), 865-872.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. EUA, Academic Press, 771p.
- Houssa, R.; Pion J. C. e Yésou, H. (1996). "Effects of granulometric and mineralogical composition on spectral reflectance of soils in a Sahelian Area." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **51** (6), 284-298.
- Houston, S. L.; Houston, W. N. e Wagner, A. M. (1994). "Laboratory filter-paper suction measurements." *Geotechnical Testing Journal*, **17** (2), 185 -194.
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Reginato, R. J., Kimbal, B. A. e Nakayama, F. S. (1975). "The dependence of bare soil albedo on soil water content." *Journal of Applied Meteorology*, **14**, 109-113.

- Kimes, D. S. e Kirchner, J. A. (1982). "Irradiance measurement errors due to the assumption of a Lambertian reference panel". *Remote Sensing of Environment*, **12**, 141-149.
- Labsphere (1998). *Calibration Certificate of Spectralon Reflectance Target*. North Sutton.
- Lanças, K. P.; Gabriel Filho, A. e Banderali, M. (1993). "Efeito da compactação do solo realizada em laboratório sobre algumas de suas propriedades físicas. Parte I: Apropriação da Metodologia". *Anais 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, v. 3, 1989-2001, Ilheus-BA, Brasil.
- Lillesand, T. M. e Kiefer, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. EUA, John Wiley & Sons, 3ª ed., 750p.
- Lima, M. C. (2002). *Diagnóstico, Prevenção e Controle de Erosões*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília. DF. (Não publicado)
- Lindberg, J. D. e Snyder, D. G. (1972). "Diffuse reflectance spectra of several clay minerals." *American Mineralogist*, **57** (1), 485-493.
- Madeira Netto, J. (2000). "Comportamento espectral de solos." In: Meneses, P. R. (org). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos Alvos Naturais*. (Não publicado), 79-99.
- Mathews, H. L.; Cunningham, R. L. e Petersen, G. W. (1973). "Spectral reflectance of selected Pennsylvania soils." *Soil Science Society of America Journal*, **37** (3), 421-424.
- Mattikalli, N. M. (1997). "Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral measurements". *Remote Sensing of Environment*, **59**, 14-28.
- Mattikalli, N. M.; Engman, E. T.; Ahuja, L. R. e Jackson, T. J. (1996). "A GIS for spatial and temporal monitoring of microwave remotely sensed soil moisture and estimation of soil properties." *HydroGYS: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management*, IAHS Publ. n° 235.
- MDI (1991). *JADE. XRD Pattern Processing and Identification*. EUA, Materials Data Incorporated, version 3.0.
- Meneses, P. R. (2000a). "Fundamentos de radiometria óptica espectral." In: Meneses, P. R. (org). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais*. (Não publicado), 1-17.
- Meneses, P. R. (2000b). "Origem das feições espectrais." In: Meneses, P. R. (org). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais*. (Não publicado), 18-30.
- Milton, E. J. (1987). "Principles of field spectroscopy." *International Journal of Remote Sensing*, **8** (12), 1807-1827.
- Muller, E. e Décamps, H. (2000). "Modeling soil moisture-reflectance". *Remote Sensing of Environment*, **76**, 173-180.
- Novo, E. M. L. M. (1992). *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. São Paulo, Editora Edgard Blücher, 2ª ed., 308p.
- Novo, E. M. L. M. (2000). "Comportamento espectral da água." In: Meneses, P. R. (org). *Sensoriamento Remoto: Reflectância dos alvos naturais*. (Não publicado), 129-143.
- Oliveira, S. A.; Mesquita Filho, M. V.; Souza, A. F. e Fontes, R. R. (2000). *Análises químicas de solo e de calcário para fins de fertilidade do solo*. Texto Universitário, Editora Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 31p.
- Price, R. R. e Gaultney, L. D. (1993). "Soil moisture sensor for predicting seed planting depth." *Transactions of the ASAE*, **36**, (6) 1703-1711.
- Schmugge, T. J. (1980). "Survey of methods for soil methods estimation". *Water Resources Research*, **16**, 961-979.
- Schowengerdt, R. A. (1997). *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. EUA, Academic Press, 2ª ed., 521 p.
- Senay, G. B., Ward, A. D., Lyon, J. G., Fausey, N. R., Nokes, S. E. e Brown, L. C. (2000). "The relations between spectral data and water in a crop production environment." *International Journal of Remote Sensing*, **9**, 1897-1910.

- Siegal, B. S. e Goetz, A. F. H. (1977). "Effect of vegetation on rock and soil type discrimination." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **48** (2), 191-196.
- Soilmoisture (1997). *Modelo 2725 Tensiómetro Jet Fill: Manual de Operación*. EUA, 12 p.
- Soilmoisture (1995). *Tempe Pressure Cell: Operating Instructions*. EUA, 12p.
- Steffen, C. A. (1996). "Fundamentos de radiometria." *Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (tutorial)*, 1-1 a 1-17, Salvador-BA.
- Stoner, E. R. e Baumgardner, M. F. (1981). "Characteristic variations in reflectance of surface soils." *Soil Science Society of America Journal*, **45** (6), 1161-1165.
- Stoner, E. R.; Baumgardner, M. F.; Biehl, L. L. e Robinson, B. F. (1980a). *Atlas of soil reflectance properties*. EUA, Agricultural Experiment Station - Purdue University, Research Bulletin 962.
- Stoner, E. R.; Baumgardner, M. F.; Weismiller, R. A.; Biehl, L. L. e Robinson, B. F. (1980b). "Extension of laboratory-measured soil spectra of field conditions." *Soil Science Society of America Journal*, **44** (3), 572-574.
- Stoner, E. R.; Derksen, I. e Macedo, J. (1991). "Discriminação espectral de latossolos do Planalto Central Brasileiro." *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **26** (10), 1599-1606.
- Swain, P. H. e Davis, S. M. (ed.) (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. New York, McGraw - Hill, 396p.
- Taylor, J. K. e Escuderomolins, E. (1949). "Constant-flow buret based on principle of Mariotte Flask". *Analytical Chemistry*, **21** (12), 1576-1577.
- Valeriano, M. M.; Epiphanyo, J. C. N.; Formaggio A. R. e Oliveira J. B. (1995). "Bi-directional reflectance factor of 14 soil classes from Brazil." *International Journal of Remote Sensing*, **16** (1), 113-128.
- Vargas, M. (1978). *Introdução à mecânica dos solos*. São Paulo-SP, McGraw-Hill, 509 p.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS EM APUD

- Ångström D. (1925). "The albedo of various surfaces of ground." *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, **7**, 323-342.
- Baumgardner, M. F.; Kristof, S. J.; Johannsen, C. J. e Zachary, A. L. (1970). *Indiana Academy Science Proceeding*, **79**, 413-422.
- Bowker, D. E., Davis, R. E., Myrick, D. L., Stacy, K., Jones, W. T. (1985). *Spectral Reflectances of Natural Targets for Use in Remote Sensing Studies*. EUA, NASA, Reference Publication 1139, 25p.
- Ganneau, C. M. G. (1975). Docteur Ingenieur Dissertation, University of Paris-Sud, Center d'Orsay.
- Hunt, G. R. e Salisbury, J. W. (1970). "Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals." *Modern Geology*, **1**, 283-300.
- Hunt, G. R.; Salisbury, J. W.; Lenhoff, C. J. (1971). "Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III. Oxides and hydroxides". *Modern Geology*, **2**, 195-205.
- Madeira Netto, J. (1993). *Étude Quantitative des Relations Constituants Minéralogiques Réflectance Diffuse des Latosols Brésiliens. Applications a l'utilisation pédologique des donnés satellitaires TM (région de Brasília)*. Éditions de l'ORSTOM, Paris, 236p.
- Price, R. R.; Huang, X. e Gaultney, L. D. (1990). *Development of a soil moisture sensor*. ASAE Paper n° 90-3555. St. Joseph, MI: ASAE.
- Stoner, E. R. (1979). *Physicochemical, Site, and Bidirectional Reflectance Factor Characteristics of Uniformly Moist Soils*. Tese de Doutorado, Purdue University, West Lafayette, Indiana, EUA.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)