

**MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-6339-TDI/591

**SIMULAÇÃO DO COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO DE RADAR
NA BANDA C PARA SOLOS NUS TÍPICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Reinaldo Gen Ichiro Arakaki

**Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo
Dr. Hermann Johann Heinrich Kux, aprovada em março de 1994.**

**INPE
São José dos Campos
Março de 1994**

528.88:631.47

ARAKAKI, R.G.I.

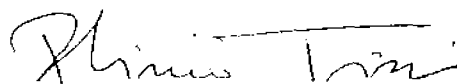
Simulação do coeficiente de retroespalhamento de radar na banda C para solos nus típicos do Estado de São Paulo / R.G. I. Arakaki. - São José dos Campos: INPE, 1994.

119p. - (INPE-6339-TDI/591)

1. Radar de abertura sintética (SAR).
2. Retroespalhamento. 3. Coeficiente de espalhamento. 4. Solos expostos. 5. Rugosidade de superfície. 6. ERS-1 (Esa Satellite). 7. São Paulo (Estado). I. Título.

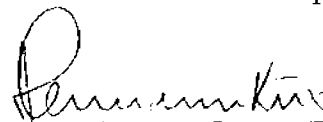
Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento a requisito exigido
para a obtenção do Título de Mestre
Sensoriamento Remoto

Dr. Plínio Tissi



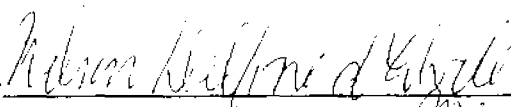
Presidente

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux



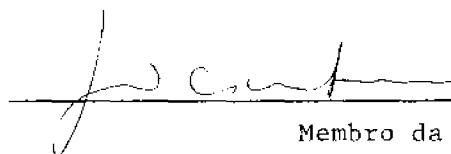
Orientador

Dr. Nelson Delfino d'Ávila Mascarenhas



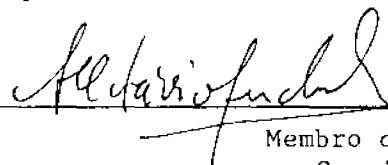
Membro da Banca

Dr. João Vianeí Soares



Membro da Banca

Dr. Antonio Octávio Martins de Andrade



Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Reinaldo Gen Ichiro Arakaki

São José dos Campos, 11 de março de 1994

Aos meus pais, Gensho e Yuko, e meus irmãos
Sidney, Nelly e Flávio, dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Hermann J. H. Kux pela orientação e estima.

Ao Eng. Amauri Silva Montes, pelo apoio, pelos ensinamentos e pela amizade, acreditando sempre na possibilidade deste trabalho.

Ao Eng. Ulf Walter Palme, pelo valoroso incentivo, ajuda e amizade para que este trabalho fosse desenvolvido.

Ao Dr. José Roberto Provesi, pela grande estima e ajuda sem a qual as medidas de rugosidade dos solos não teriam sido possíveis.

À Enga. Regina P. Nitzsche pela grande ajuda na medida da rugosidade dos solos.

Ao Capitão Darcton P. Damião, pela ajuda prestada nas medições de campo, sem a qual este trabalho não teria sido realizado.

À analista de sistemas Maria Goretti Santos Aquino pelo auxílio prestado na parte da digitalização das fotos dos perfis de solos.

Ao Desenhista Quim pelo capricho do material ilustrativo.

Ao IPT, na pessoa de Geólogo Antonio M. Saad pelo apoio nas medidas de campo.

À Fazenda da Lagoa do Fogão, na pessoa de Maurício Sakai por ter fornecido sua fazenda para as medições da rugosidade.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, por toda infraestrutura fornecida durante estes anos de trabalho.

Ao CNPQ que proporcionou a realização deste trabalho.

E a todos que, de alguma forma ajudaram para a execução deste trabalho.

RESUMO

Após um período de grande utilização dos sensores orbitais (LANDSAT, SPOT), surgem a partir desta década os sistemas imageadores de radar. Desde 1992, o Brasil está sendo imageado pelo sistema SAR orbital ERS-1. Diversas questões estão em aberto quanto aos novos produtos gerados pelo radar do ERS-1, como quais os parâmetros do alvo que influenciam as suas imagens. Este trabalho procura simular o coeficiente de retroespalhamento radar gerado pelo SAR-ERS-1 sobre cinco tipos de solos do Estado de São Paulo. Para tanto, utilizou-se um modelo de permitividade complexa de Hallikainen (1985), e para relacioná-lo ao σ° (coeficiente de retroespalhamento) foi escolhido um modelo empírico entre os modelos encontrados na literatura (modelo de pequenas perturbações, modelos de Kirchhoff e modelo da equação integral). Foi desenvolvida uma metodologia para a medição de rugosidade do solo, obtendo-se a altura rms e coeficiente PHC, parâmetros importantes para o entendimento do sinal de retorno do radar. Os resultados mostraram que o modelo de Hallikainen apresenta discrepâncias com o encontrado por Palme (1986). Os parâmetros de rugosidade se mostraram extremamente aleatórios e sensíveis. O modelo empírico mostrou que a umidade volumétrica e a rugosidade dos solos são os principais parâmetros do solo responsáveis pelo sinal de retorno de radar e que, para reduzir o efeito da rugosidade e assim ter condições de poder avaliar a umidade volumétrica dos solos deve-se ter alturas rms maiores do que 4 cm.

**SIMULATION OF RADAR BACKSCATTER COEFFICIENT AT C-BAND FOR
TYPICAL BARE SOILS IN SAO PAULO STATE (BRAZIL)**

ABSTRACT

After almost 20 years of optical orbital sensors (Landsat and SPOT), the nineties will be the decade of radar imaging systems. Since 1992, Brazil has been imaged by the orbital SAR system ERS-1. Several open questions remain regarding the new products generated by this imaging radar, e.g. the effects of target characteristics on image composition. This study simulates the backscatter coefficient generated by SAR/ERS-1 on five soil types found in São Paulo State, Brazil. For the simulations the complex permittivity model of Hallikainen (1986) was used. To correlate this model to Sigma nought (backscatter coefficient) an empirical model was chosen from among those existing in the literature (e.g. small perturbation model, Kirchhoff models and the model of integral equation). A methodology for the measurement of soil roughness was developed and the soil parameters rms height and PHC coefficient were obtained. These parameters are relevant for an understanding of radar backscatter. The results show that Hallikainen's model presents discrepancies when compared with the model developed by Palme (1986). The roughness parameters exhibited extreme sensitivity. The empirical model showed that the volumetric moisture and the soil roughness are the main soil parameters and, in order to reduce the roughness effect and to properly evaluate the volumetric soil moisture, rms heights above 4 cm are required.

SUMÁRIO

	<u>Pág</u>
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS</u>	5
2.1 - Ondas eletromagnéticas	5
2.1.1 - Meio dielétrico ideal	6
2.1.2 - Meio dielétrico com perdas	7
2.2 - Espectro de microondas	9
2.3 - Princípio básico de funcionamento de radar	10
2.3.1 - Equação radar	10
2.3.2 - Seção transversal radar	13
2.3.3 - Coeficiente de retroespalhamento de radar	14
2.4 - Propriedades dielétricas dos solos	15
2.5 - Caracterização de superfícies rugosas	16
2.5.1 - Desvio padrão da altura da superfície	17
2.5.2 - Pontos horizontalmente correlacionados (coeficiente PHC)	18
2.6 - Relações entre σ° e outros parâmetros	21
2.6.1 - Dependência do ângulo de incidência	21
2.6.2 - Dependência da altura rms (s)	21
2.6.3 - Dependência da frequência	26
2.6.4 - Dependência da umidade do solo	26
2.7 - Modelo de permitividade complexa	29
2.8 - Modelos de σ° para solos expostos	30
2.8.1 - Modelo de pequenas perturbações	31
2.8.2 - Modelo de espalhamento de Kirchhoff	32
2.8.2.1 - Física óptica	33
2.8.2.2 - Geometria óptica	34

2.8.3 - Modelo da equação integral	35
2.8.4 - Modelo empírico	37
<u>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS</u>	41
3.1 - Materiais	41
3.1.1 - Dados de rugosidade	41
3.1.2 - Dados de umidade volumétrica	41
3.1.3 - Dados de tipos de solos	42
3.2 - Métodos	43
3.2.1 - Determinação da permitividade complexa	43
3.2.2 - Determinação da rugosidade	43
3.2.3 - Modelos utilizados	45
3.2.4 - Parâmetros do ERS-1	45
3.2.5 - Diagrama de geração de σ°	46
<u>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	49
4.1 - Avaliação do modelo de permitividade	49
4.2 - Avaliação dos parâmetros de rugosidade	52
4.3 - Escolha do modelo	58
4.4 - Avaliação do modelo empírico	60
<u>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE A - COEFICIENTES DE REFLEXÃO DE FRESNEL	75
APÊNDICE B - GRÁFICOS DOS SOLOS LR, LVA, PVA E PVE	77
APÊNDICE C - LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS	91

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 - Efeito das nuvens na transmissão de microondas ...	2
1.2 - Efeito da chuva na transmissão de microondas	3
2.1 - Espectro de microondas e sua nomenclatura	9
2.2 - Geometria envolvida na equação radar	11
2.3 - Exemplo de (a) perfil de uma superfície, e (b) função autocorrelação correspondente	20
2.4- Resposta angular de σ° para campos liso, meio rugoso e rugoso com alto grau de teor de umidade em (a) 2,75 GHz, (b) 5,25 GHz e (c) 7,25 GHz	22
2.5 - σ° como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 0° em quatro condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz	23
2.6 - σ° como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 10° em quatro condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz	24
2.7 - σ° como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 20° em quatro condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz	25
2.8 - Resposta da frequência a σ° na polarização HH e ângulos de incidência de 10° , 15° e 20° para uma certa condição de umidade superficial de um solo franco argiloso siltado.	27
2.9 - Resposta da frequência a σ° em vários estados de umidade e rugosidade (a) $\theta=10^\circ$ e (b) $\theta=30^\circ$	28
2.10- Resposta da umidade do solo para três perfis de rugosidade a 2,75 GHz para (a) 0° e (b) 10°	29
3.1 - Rugosímetro	44
3.2 - Diagrama de geração de σ°	46

4.1-	Comparação do Modelo de Hallikainen (mh) com o Ajuste de Palme (mp)	51
4.2	- Perfil do solo para $s = 0,479$ e $\ell=3$	54
4.3	- Perfil do solo para $s=4,8$ e $\ell=14$	55
4.4	- Dois perfis de solo com o valor de s semelhantes porém valores de ℓ diferentes.(a) $s=3,1$ e $\ell=13$; (b) $s=3,105$ e $\ell=9$	56
4.5	- Comparação de σ^o de 5 tipos de solos	61
4.6	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade	62
4.7	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade	63
4.8	- Valores de σ^o em função da altura rms para 3 teores de umidade	65
B.1	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade	78
B.2	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade	79
B.3	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade	80
B.4	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade	81
B.5	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade	82
B.6	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade	83
B.7	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade	84
B.8	- Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade	85
B.9	- Valores de σ^o em função da altura rms para 3 teores de umidade	86
B.10	-Valores de σ^o em função da altura rms para 3 teores de umidade	87

B.11	-Valores de σ° em função da altura rms para 3	
	teores de umidade	88
B.12	-Valores de σ° em função da altura rms para 3	
	teores de umidade	89

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - COEFICIENTES DA EXPRESSÃO POLINOMIAL	30
2.2 - CONDIÇÕES DE VALIDADE DOS MODELOS	38
3.1 - VALORES DE UMIDADE VOLUMÉTRICA	41
3.2 - PARÂMETROS DO SENSOR AMI	45
4.1 - VALORES DE PERMITIVIDADE	49
4.2- VALORES DE PERMITIVIDADE PARA DOIS TIPOS DE SOLOS DIFERENTES	50
4.3 - VALORES DE RUGOSIDADE PARA CADA PERFIL AVALIADO ..	53
4.4 - VALIDADE DOS MODELOS APRESENTADOS	58
4.5 - VALORES DE AUMENTO DOS VÁRIOS TIPOS DE SOLOS EM DB/CM	64

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{D}	- Vetor deslocamento elétrico, coulomb/m ²
\vec{B}	- Vetor indução magnética, weber/m ²
\vec{E}	- Vetor campo elétrico, volt/m
\vec{J}	- Densidade de corrente, ampere/m ²
\vec{H}	- Densidade magnética, ampere/m
Gt	- Ganho do transmissor
Pt	- Potência transmitida
Rt	- Distância do transmissor-alvo
Rr	- Distância do receptor-alvo
Ar	- Área da abertura efetiva da antena receptora
E _y	- Componente do campo elétrico na direção y, volt/m
Pr	- Potência recebida
E _o	- Intensidade de campo elétrico da onda incidente sobre o alvo
E _e	- Intensidade do campo elétrico da onda espalhada no radar.
L	- Banda L de microondas
C	- Banda C de microondas
X	- Banda X de microondas
M _a	- Massa de água na amostra, g
M _s	- Massa da amostra seca, g
V _a	- Volume de água, cm ⁻³
V _t	- Volume total da amostra, cm ⁻³
W	- Espectro de rugosidade (a transformada de Fourier da função de autocorrelação)
R _{per}	- Coeficiente de reflexão de Fresnel para polarização horizontal.
R _{par}	- Coeficiente de reflexão de Fresnel para polarização vertical
S	- Porcentagem de areia encontrada no solo
C	- Porcentagem de argila encontrada no solo
uv	- Umidade volumétrica, cm ³ .cm ⁻³

a, b, c	- Coeficientes da expressão polinomial de Hallikainen
s	- Desvio padrão da variação da altura da superfície (ou altura rms), cm
ℓ	- Coeficiente PHC (correlation length), cm
c_0	- Velocidade da luz no vácuo, m/s
m	- Derivada rms (rms slope)
c	- Velocidade da luz, m/s
k	- Número de onda, rad/cm
k_0	- Número de onda no vácuo
j	- Número complexo ($\sqrt{-1}$)
q_v	- Carga elétrica por unidade de volume, coulomb/m ²
n	- Índice de refração
μ	- Permeabilidade absoluta do meio
ϵ	- Permittividade absoluta do meio
ν	- Condutividade elétrica do meio
ω	- Velocidade angular, rad/s
θ	- Ângulo de incidência, rad
λ	- Comprimento de onda, cm
μ_0	- Permeabilidade absoluta do vácuo
ν	- Freqüência, Hz
ϵ_0	- Permittividade absoluta do vácuo
ϵ_r^*	- Permittividade complexa relativa.
ϵ_r'	- Constante dielétrica relativa
ϵ_r''	- Fator de perda relativa
σ	- Seção transversal do radar
σ^o	- Coeficiente de retroespalhamento radar
σ_{hh}^o	- Coeficiente de retroespalhamento radar na polarização HH
σ_{ppc}	- Coeficiente de espalhamento da parte coerente
σ_{ppn}	- Coeficiente de espalhamento da parte incoerente
σ_{pps}	- Coeficiente de espalhamento da parte correspondente a inclinação da superfície
ρ_a	- Densidade da água = 1 g.cm ⁻³
ρ	- Função de auto-correlação

- $\rho''(0)$ - Derivada segunda da função de autocorrelação avaliada em zero
- Γ - Coeficiente de propagação complexo do meio
- Γ_0 - Refletividade de Fresnel da superfície na nadir
- Γ_h - Refletividade de Fresnel na polarização horizontal
- Γ_v - Refletividade de Fresnel na polarização vertical

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Após um período de grande utilização dos sensores orbitais (LANDSAT, SPOT) que operam na faixa do visível e infravermelho, surgem a partir desta década os sistemas imageadores de radar. Vários sistemas SAR orbitais já estão em funcionamento como o ESA/ERS-1, e J-ERS-1 (Japão). A missão SIR-C/X-SAR foi lançada neste ano e o sistema RADARSAT será lançado no ano vindouro.

Esta nova tecnologia na faixa de microondas é de grande interesse para as regiões tropicais, devido as limitações impostas pela freqüente cobertura de nuvens impedindo que os sistemas óticos atualmente disponíveis (LANDSAT, SPOT) sejam eficazes na obtenção de informações. As nuvens são praticamente transparentes a quase todo espectro de microondas (figura 1.1) e no caso de chuva a atenuação é um pouco maior, porém, para comprimentos de onda maiores do que 5cm é menor do que 10% (figura 1.2) (Ulaby et al, 1981 p.1).

Outra grande motivação para a utilização de dados de sistemas radar é a sua capacidade de penetração tanto em solos como na vegetação ser maior do que em sistemas óticos, pois o comprimento de onda de sistemas radar é da ordem de centímetros.

Outra vantagem destes sensores, é o fato de que geram seu próprio sinal e portanto poderão operar também à noite.

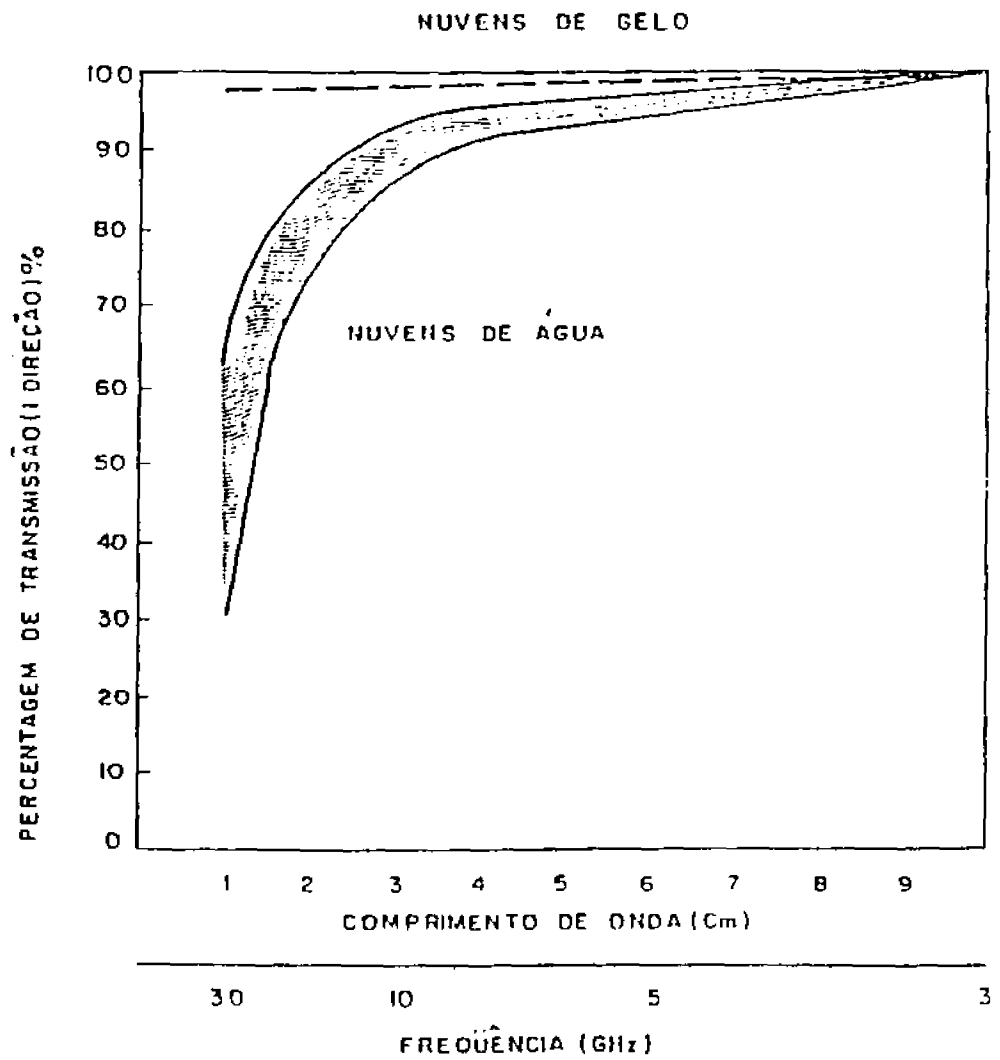


Fig. 1.1 - Efeito das nuvens na transmissão de microondas
FONTE: Ulaby (1981), p.2.

Os instrumentos de sensoriamento remoto adquirem informações a respeito de um determinado alvo pela detecção e medição da mudança que o objeto impõe ao campo eletromagnético incidente. Na região de microondas ativo, a informação se refere a propriedades elétricas do alvo através da análise do campo refletido quando o sensor ilumina o objeto, utilizando ondas eletromagnéticas bem definidas.

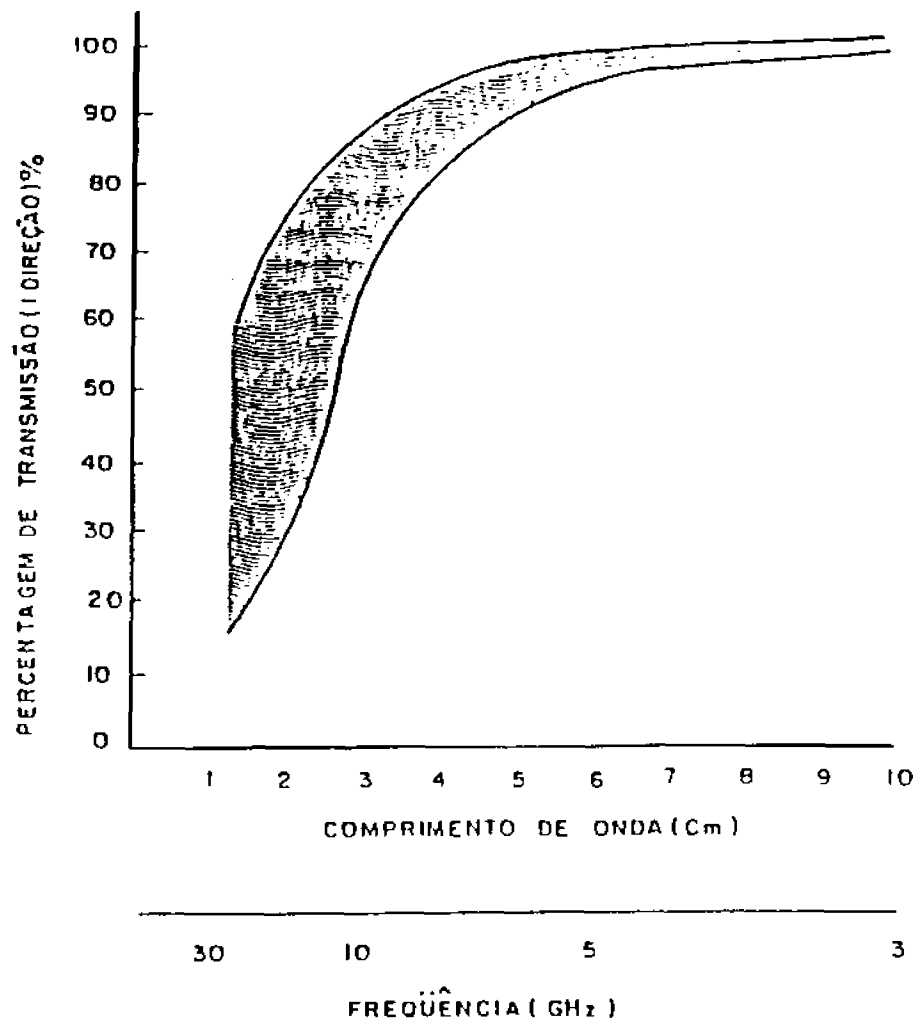


Fig. 1.2 - Efeito da chuva na transmissão de microondas.

FONTE: Ulaby (1981), p.3.

A partir de 1992, o Brasil está sendo imageado pelo sistema SAR orbital ERS-1. Há diversas questões em aberto quanto aos novos produtos gerados pelo radar do ERS-1, como por exemplo, quais são os parâmetros do alvo que influenciam as suas imagens.

Dentro deste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar os parâmetros do sistema sensor e do alvo, que influem no sinal de retorno radar. Isto será feito através da simulação do coeficiente de retroespalhamento. Para tanto foi escolhido, dentre os vários modelos disponíveis, um modelo de retroespalhamento de radar em solos expostos, para avaliar a influência da umidade, da rugosidade, e da textura dos solos nos parâmetros do sistema ERS-1 (ângulo de incidência, tipo de polarização, frequência). Pretende-se assim contribuir para melhor entender os produtos disponíveis por este novo sistema sensor.

Em função disso, as etapas seguidas foram

1) Geração através do modelo de Hallikainen, da permitividade complexa relativa (dados de entrada : porcentagem de argila e areia + umidade volumétrica)

2) Geração dos parâmetros de rugosidade (s e ℓ - altura rms e coeficiente phc) através dos perfis dos solos.

3) Considerando como parâmetros fixos o ângulo de incidência, a polarização e o comprimento de onda, escolheu-se um modelo empírico de retroespalhamento gerando-se o coeficiente de retroespalhamento radar.

CAPÍTULO 2FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para a caracterização de um solo na faixa de microondas, é necessário conhecer o tipo de interação que ocorre entre o sistema sensor e as propriedades do alvo. Segue-se uma descrição sucinta destes tópicos.

2.1 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS

A teoria eletromagnética esta embasada nas leis de Maxwell que segundo Kruse (1963) são

$$\nabla \cdot \vec{D} = q_v \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2.4)$$

onde \vec{D} é o vetor deslocamento elétrico em coulomb/m²,

q_v é a carga elétrica por unidade de volume em coulomb/m³,

\vec{B} é o vetor indução magnética em weber/m²,

\vec{E} é o vetor campo elétrico em volt/m,

\vec{J} é a densidade de corrente em ampere/m²,

\vec{H} é a intensidade magnética em ampere/m.

que podem ser derivadas para descrever a transmissão de ondas eletromagnéticas através de algum meio, para

$$\nabla^2 \vec{E} - \text{grad}(\text{div } \vec{E}) = \mu_0 \cdot \partial \vec{J} / \partial t + \epsilon_0 \mu_0 \cdot \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 \quad (2.5)$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu \nu \cdot \partial \vec{H} / \partial t + \epsilon \mu \cdot \partial^2 \vec{H} / \partial t^2 \quad (2.6)$$

e que são conhecidas como equações de onda eletromagnética,

onde μ = permeabilidade absoluta do meio

ϵ = permitividade absoluta do meio

ν = condutividade elétrica do meio

\vec{E} = vetor campo elétrico

\vec{H} = vetor intensidade magnética

2.1.1 MEIO DIELÉTRICO IDEAL

Assumimos que

$$\nu = 0 \quad (2.7)$$

$$q_v = 0 \quad (2.8)$$

temos então

$$\text{div } \vec{E} = 0 \quad (2.9)$$

o que reduz a equação 2.5

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \epsilon \cdot \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 \quad (2.10)$$

Resolvendo a equação para a componente E_y temos

$$E_y = E_{y_c} \exp(j(\omega t - kx)) \quad (2.11)$$

onde

$$k = \omega / c = 2\pi / \lambda \quad (2.12)$$

é conhecida por fator de propagação do meio.

No vácuo tem-se analogamente

$$k_0 = \omega / c_0 = 2\pi / \lambda_0 \quad (2.13)$$

Define-se índice de refração por

$$n = c_0 / c \quad (2.14)$$

onde

$$c = 1 / \sqrt{\mu \epsilon} \quad (2.15)$$

c é a velocidade da luz no meio de propagação e

$$c_0 = 1 / \sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)} \quad (2.16)$$

c_0 é a velocidade da luz no espaço livre. Pode-se ainda definir o índice de refração por

$$n = k / k_0 \quad (2.17)$$

e a partir das equações 2.12, 2.13 e 2.17 temos

$$n = (\mu \epsilon / \mu_0 \epsilon_0)^{1/2} = (\mu_r \epsilon_r)^{1/2} \quad (2.18)$$

Exceto para materiais ferromagnéticos o valor de μ_r é aproximadamente 1 de forma que

$$n = (\epsilon_r)^{1/2} \quad (2.19)$$

onde ϵ_r é a permitividade relativa.

2.1.2 MEIO DIELÉTRICO COM PERDAS

Assumimos que

$$q_v = 0 \quad (2.20)$$

$$\text{div } \vec{E} = 0 \quad (2.21)$$

E a equação 2.5 reduz-se a

$$\nabla^2 \vec{E} = \mu\nu \cdot \partial \vec{E} / \partial t + \epsilon\mu \cdot \partial^2 \vec{E} / \partial t^2 \quad (2.22)$$

Resolvendo a equação para a componente E_y temos

$$E_y = E_{y_0} \exp(j(\omega t - \Gamma x)) \quad (2.23)$$

onde Γ é chamado coeficiente de propagação complexo do meio dado por

$$\Gamma = (4\epsilon\mu\pi^2\nu^2 - 2\pi\nu j\mu\nu)^{1/2} \quad (2.24)$$

Analogamente ao caso anterior onde $n=k/k_0$ tem-se

$$n^* = \Gamma / k_0 \quad (2.25)$$

onde n é o índice de refração complexo do meio.

Como na equação 2.19 temos

$$\epsilon_r^* = (n^*)^2 \quad (2.26)$$

$$\epsilon_r^* = \Gamma^2 / k_0^2 \quad (2.27)$$

onde ϵ_r^* é a permitividade complexa relativa.

Substituindo na equação 2.27 temos

$$\epsilon_r^* = (\mu / \mu_0) \epsilon_r' - j(\mu / \mu_0) \nu(\omega \epsilon_0) \quad (2.28)$$

Assumindo $\mu = \mu_0$ tem-se

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\omega / \omega \epsilon_0 \quad (2.29)$$

ou ainda

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.30)$$

onde ϵ_r' = constante dielétrica relativa

ϵ_r'' = fator de perda relativa

2.2 ESPECTRO DE MICROONDAS

A Figura 2.1 mostra o espectro de microondas que varia de 0,3 GHz a 300 GHz, apesar de não haver uma definição concreta sobre estes limites.

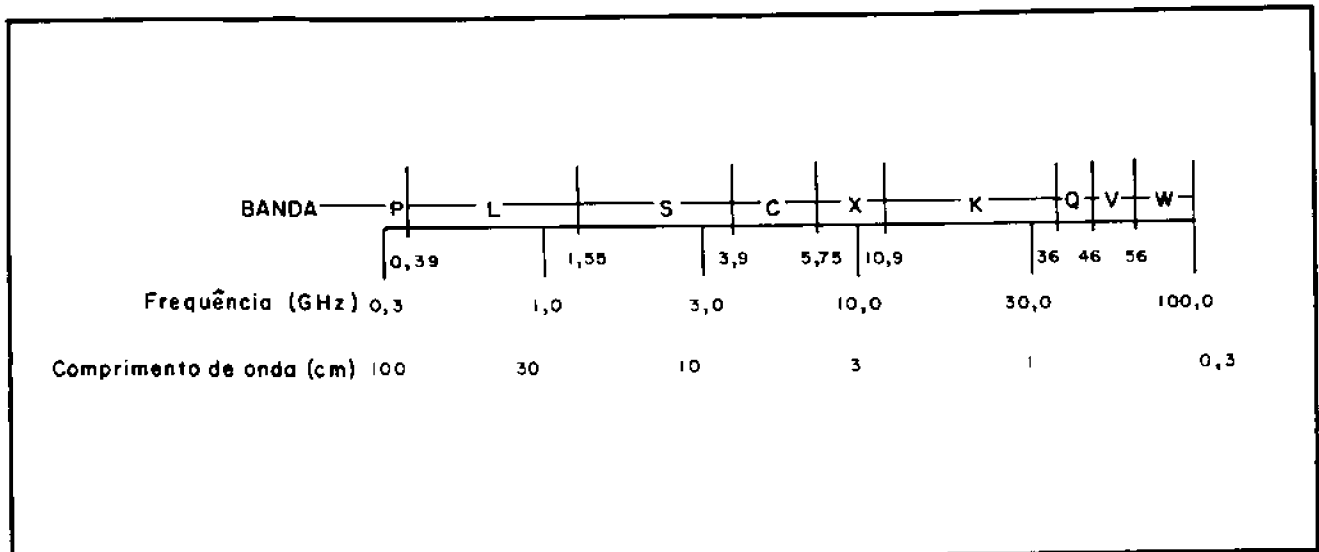


Fig. 2.1 - Espectro de microondas e sua nomenclatura
 FONTE: Adaptado de Ulaby et al. (1981), p. 19.

Skolnik (1990) afirma que as letras referem-se a diferentes comprimentos de onda na faixa de microondas sendo que tais designações foram utilizadas durante a 2ª Guerra Mundial por motivos de segredo militar. Com o passar do tempo, a necessidade do segredo deixou de existir, porém as letras foram mantidas com esta finalidade.

2.3 PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE RADAR

O termo radar é um acrograma de "radio detection and ranging" um termo cunhado quando sua utilização era simplesmente detectar alvos e determinar a sua distância. Atualmente entende-se como radar um sistema que irradia uma onda eletromagnética e detecta o seu eco a partir de objetos que refletem. A natureza do sinal do eco fornece informações do objeto-alvo (Ulaby et al., 1981 p.33).

Basicamente a detecção por um radar constitui-se num "trem" de pulsos curtos gerados por um transmissor e irradiado pelo espaço por uma antena. Um "duplexador" permite que essa antena tenha a função tanto de recepção como de transmissão. Os objetos-alvo são atingidos por esta radiação e retornam uma porção de sinal do radar, sendo que uma parte desta radiação retorna na direção do radar. O eco do sinal é coletado pela antena do radar e processada.

2.3.1 EQUAÇÃO RADAR

A relação fundamental entre as características do radar, o alvo, e o sinal recebido é chamado de equação radar.

A geometria envolvida nesta equação é mostrada na Figura 2.2.

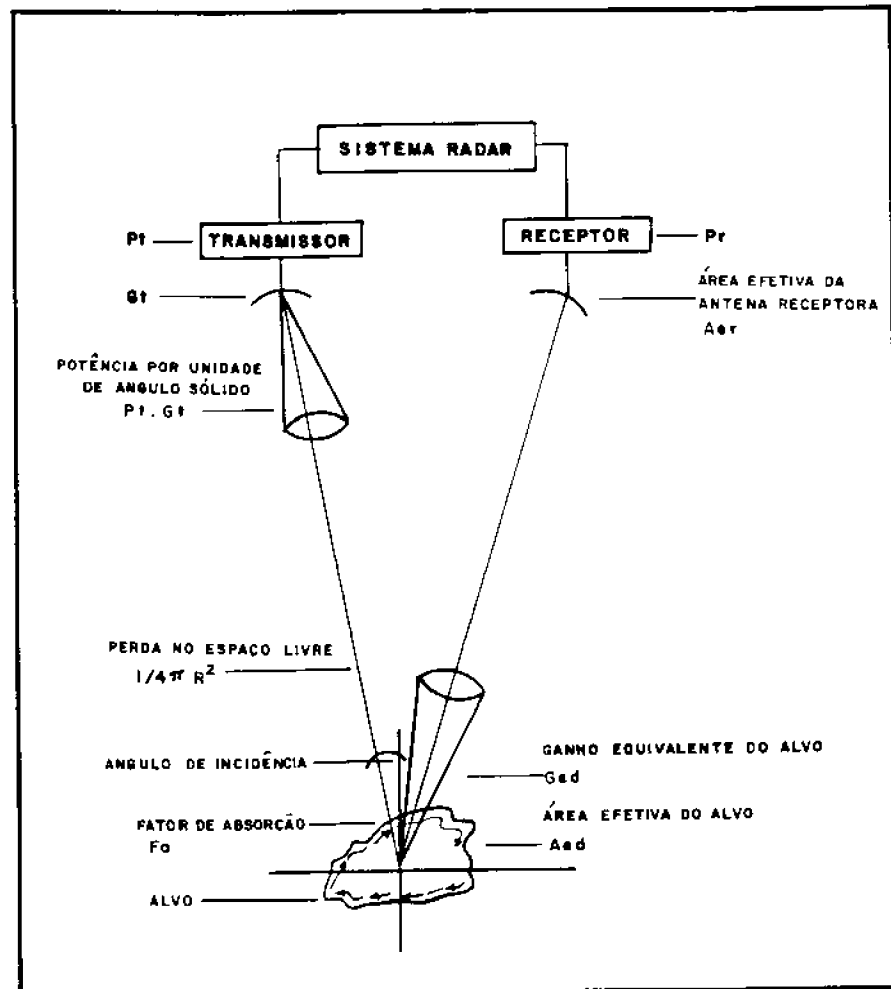


Fig. 2.2 - Geometria envolvida na equação radar
 FONTE: Parada (1992), p. 12.

A forma final da equação radar obtida por Ulaby et al (1982) é:

$$Pr = Pt \cdot Gt \cdot Ar \cdot \sigma / (4\pi)^2 \cdot Rt^2 \cdot Rr^2 \quad (2.31)$$

onde:

Gt Ganho do transmissor;

Pt Potência transmitida;

Rt Distância do transmissor-alvo;

Rr Distância do receptor-alvo;

Ar Área da abertura efetiva da antena receptora;

σ Seção transversal do radar;

Pr Potência recebida.

Para o caso de um radar monostático, ou seja, quando a mesma antena é utilizada para recepção e transmissão, temos :

$$Rt = Rr = R \quad (2.32)$$

$$Gt = Gr = G \quad (2.33)$$

$$At = Ar = A \quad (2.34)$$

Considerando que a área efetiva (A) da antena está relacionada com seu ganho (G) por:

$$A = \lambda^2 \cdot G / 4\pi \quad (2.35)$$

temos então, reescrevendo a equação (2.31)

$$Pr = \left[\frac{Pt \cdot G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \right] \cdot [\sigma] \quad (2.36)$$

Segundo Skolnik(1990), podemos analisar a equação radar da seguinte forma: a primeira parte é a potência recebida (P_r), o valor medido pelo radar; a segunda parte são os parâmetros do sistema e a terceira parte, os parâmetros do alvo. Concluimos portanto, que, se conhecermos bem a potência recebida e os parâmetros do sistema, poderemos obter o valor de σ .

2.3.2 SEÇÃO TRANSVERSAL RADAR

A radiação eletromagnética que incide sobre um alvo é espalhada em todas as direções com alguma intensidade. A intensidade que volta para a fonte de radiação (chamada de retroespalhamento) constitui o eco radar do objeto. A intensidade de eco é descrita pela seção transversal radar do alvo.

A definição experimental é obtida isolando a seção transversal radar da equação 2.36. Assim procedendo (σ) terá dimensão de área. A unidade presentemente aceita é o m^2 .

A definição formal de seção transversal radar é

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \cdot |E_e|^2 / |E_o|^2 \quad (2.37)$$

onde E_o é a intensidade de campo elétrico da onda incidente sobre o alvo e E_e é a intensidade do campo elétrico da onda espalhada no radar. Embora a maioria dos alvos não espalhe a energia uniformemente em todas as direções, esta definição assume que sim, permitindo calcular a densidade de potência espalhada sobre uma

superfície de uma esfera de raio R centrada no objeto-alvo. Toma-se R como a distância do radar ao alvo.

2.3.3 COEFICIENTE DE RETROESPALHAMENTO DE RADAR

Ao estudar o sinal de retorno do radar de solos, define-se o coeficiente de espalhamento diferencial ou coeficiente de retroespalhamento como o valor médio da seção transversal radar por unidade de área, dado por

$$\sigma^0 = \left\langle \frac{\sigma_i}{\Delta A_i} \right\rangle \quad (2.38)$$

A seção transversal radar de uma porção de solo varia com a área iluminada e esta é determinada por parâmetros geométricos do radar, (Ulaby et al., 1982). Para obter um coeficiente independente destes parâmetros introduziu-se σ^0 .

O coeficiente de retroespalhamento é um número real adimensional, expresso geralmente em dB sendo dado pela seguinte expressão

$$\sigma^0 = 10 \log(\sigma^0) \quad (2.39)$$

e é função dos parâmetros do radar como frequência, polarização e ângulo de incidência e das características do alvo, principalmente das suas propriedades dielétricas e da rugosidade da superfície.

Por outro lado, há algumas restrições para o uso do coeficiente de retroespalhamento diferencial (Parada, 1992).

Deve-se considerar que a superfície observada a cada instante está constituída de grande número de alvos espalhadores elementares com valores e distribuição aleatória e que P_t , G , R são considerados constantes para cada unidade de superfície.

2.4 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DOS SOLOS

A capacidade de interação das ondas eletromagnéticas na faixa de microondas com o solo se deve às moléculas de água existentes. Estas provocam um fenômeno de absorção alterando os valores de permitividade complexa.

Sabe-se que a permitividade de um solo seco é aproximadamente de 3 e da água é 80. Portanto solos com um maior teor de água terão uma permitividade maior (Dobson e Ulaby, 1986).

As moléculas de água que por influência das forças osmóticas e matriciais ficam ao redor das partículas de solo chamam-se água presa. As moléculas de água que, por sua distância à partícula do solo, sofrem menor interação, possuem uma maior mobilidade e denominam-se água livre.

Estudos e análises realizados por Dobson e Ulaby (1986) permitiram avaliar o papel da água presa dieletricamente. Estes resultados indicam que:

1) A permitividade complexa dos solos secos é independente da frequência na região de microondas e depende da densidade aparente do solo.

2) A quantidade de água presa é controlada pela mineralogia e textura de solo (sendo grosseiramente proporcional a fração de argila do solo), que resulta em

diferenças profundas entre tipos de solos com relação a permitividade em um dado teor de umidade.

3) As diferenças observadas entre diferentes tipos de solos são dependentes da frequência e são maiores nas frequências mais baixas (abaixo de 3GHz) onde os efeitos de salinidade efetiva de fluidos de solos exercem significativa influência.

4) A dependência da frequência das propriedades dielétricas do solo é geralmente do tipo Debye e similar aquela observada pela água.

5) A permitividade complexa de solos úmidos é proporcional ao número de dipolos por unidade de volume. Portanto a unidade de medida da umidade do solo mais comumente utilizada é a volumétrica.

A unidade volumétrica é dada por:

$$U_v = V_a/V_t = V_a/V_s = M_a \cdot \rho_s / M_s \cdot \rho_a = M_a \cdot \rho_s / M_s$$

$$[U_v] = \text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \quad (2.40)$$

onde M_a e M_s são as massas de água na amostra e da amostra seca, respectivamente, V_a é o volume de água, V_t é o volume total da amostra que inclui os volumes de ar, solo e água e é igual ao volume da amostra seca (assumindo que, quando a água é acrescentada, preenche os vazios de ar mas não aumenta o volume total) e $\rho_a = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ é a densidade da água.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DE SUPERFÍCIES RUGOSAS

Uma onda incidente numa superfície rugosa é parcialmente refletida na direção especular e espalhada em

todas as direções. De acordo com o tipo de rugosidade da superfície teremos um maior efeito de um ou de outro. Por exemplo: numa superfície especular teremos apenas a componente especular; numa superfície levemente rugosa teremos as duas componentes citadas anteriormente também chamadas de coerente (a componente especular) e difusa ou incoerente (a componente espalhada); numa superfície mais rugosa a componente coerente torna-se insignificante.

Dentre os parâmetros da superfície, os mais usados são : o desvio padrão da variação da altura da superfície (ou altura rms) e o coeficiente PHC (correlation length).

2.5.1 DESVIO PADRÃO DA ALTURA DA SUPERFÍCIE

Ulaby et al. (1986) definiram que num dado plano x-y, $z(x,y)$ é a função altura no ponto x,y. Portanto, a altura média da superfície, num dado segmento de dimensões L_x e L_y será

$$\bar{z} = \frac{1}{L_x \cdot L_y} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} z(x,y) dx dy \quad (2.41)$$

e o segundo momento

$$\bar{z}^2 = \frac{1}{L_x \cdot L_y} \int_{-L_x/2}^{L_x/2} \int_{-L_y/2}^{L_y/2} z^2(x,y) dx dy \quad (2.42)$$

O desvio padrão da altura da superfície (altura rms), s , é dado por

$$s = \left(\bar{z}^2 - \bar{z}^2 \right)^{1/2} \quad (2.43)$$

Na prática utiliza-se um perfil unidimensional, s é obtido pela digitalização do perfil em valores discretos de z_i (x_i) num intervalo x (Figura 2.3). Há apenas uma restrição quanto a x , o qual não pode ser muito menor que o comprimento de onda para que o efeito de rugosidade continue válido.

2.5.2 PONTOS HORIZONTALMENTE CORRELACIONADOS (COEFICIENTE PHC)

Segundo Box e Jenkins (1976), dado um número finito de uma série temporal z_1, \dots, z_n de n observações, a função de autocorrelação pode ser definida por

$$\rho_k = c_k / c_0 \quad (2.44)$$

onde para o k ésimo intervalo

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}) \quad (2.45)$$

$$k=0, 1, 2, \dots, n$$

\bar{z} é a média da série temporal

A função de autocorrelação avalia o grau de correlação entre um ponto e outro da mesma série.

Ulaby et al. (1986) definiram o coeficiente PHC (pontos horizontalmente correlacionados) ou "correlation length" como o valor do intervalo k cuja função de autocorrelação caia para $1/e$, que normalmente é representado por ℓ . Vide Figura 2.3(b).

Portanto, se tivermos dois pontos separados por uma distância maior do que podemos garantir que estas alturas são não correlacionadas uma com a outra.

$$\rho_{\text{PIC}}(\ell) = 1/e \quad (2.46)$$

Como extensões dos parâmetros utilizados, é comum encontrarmos na literatura o k_s e o $k\ell$ (onde k é o número de onda dado por $2\pi/\lambda$).

A superfície pode ainda ser descrita pela derivada rms, m - "rms slope" - que é dada por

$$m = [-s^2 \cdot \rho''(0)]^{1/2} \quad (2.47)$$

onde $\rho''(0)$ é a derivada segunda da função de autocorrelação avaliada em zero e s a altura rms.

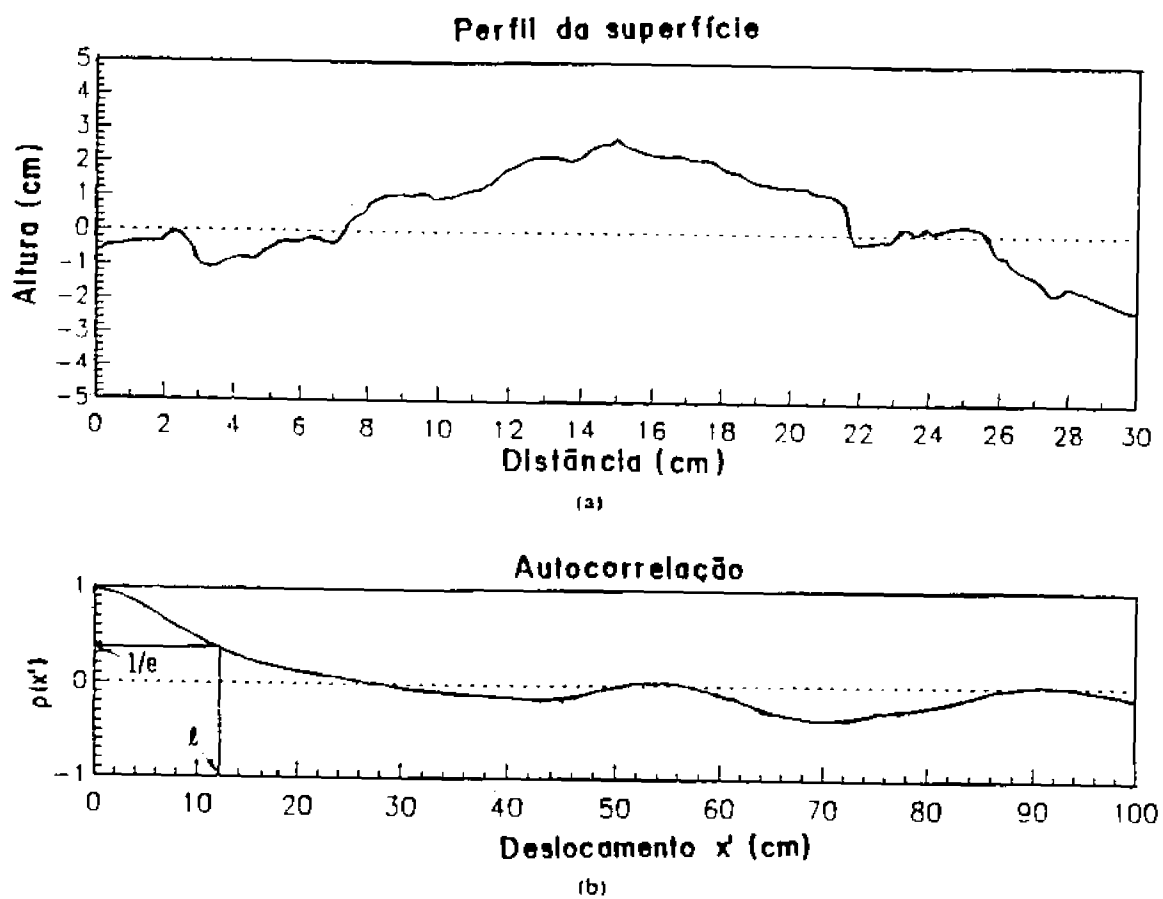


Fig. 2.3 - Exemplo de (a) perfil de uma superfície, e (b) função de autocorrelação correspondente.
FONTE: Ulaby et al. (1982), p.824.

2.6 RELAÇÕES ENTRE σ° E OUTROS PARÂMETROS

Uma revisão da literatura sobre a dependência de σ° e outros parâmetros como o ângulo de incidência, frequência, altura rms e umidade é feita abaixo.

2.6.1 DEPENDÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA

Ulaby e Batlivala (1976) observaram que o efeito da rugosidade é mínima para os ângulos de 4° a $2,75$ GHz, 10° a $5,25$ GHz e 20° a $7,25$ GHz (fig. 2.4). Ulaby et al. (1978) concluíram que σ_{hh}° é fortemente dependente da rugosidade da superfície para ângulos próximos ao nadir.

Le Toan (1982) concluiu que para a polarização HH e VV, σ° no nadir diminui com o aumento da rugosidade, Wegmüller et al. (1989) confirmaram esta relação.

2.6.2 DEPENDÊNCIA DA ALTURA RMS (s)

Ulaby e Batlivala (1976) correlacionaram (Figuras 2.5 a 2.7) ângulos de incidência (0° , 10° e 20°) com frequências ($2,75$, $4,75$ e $7,25$ GHz). Em $2,75$ GHz e ângulo de incidência 0° , o σ° é insensível a mudança de rugosidade para valores de s maiores do que $2,5$ cm, independente do teor de umidade. O mesmo passa a ocorrer com frequências mais altas, porém apenas para alguns teores de umidade. Para ângulo de incidência de 10° , para qualquer das frequências citadas anteriormente, σ° é insensível a variações de altura rms (fig. 2.6). Para o ângulo de incidência a 20° , o comportamento de σ° é similar para alturas rms maiores do que $3,0$ cm.

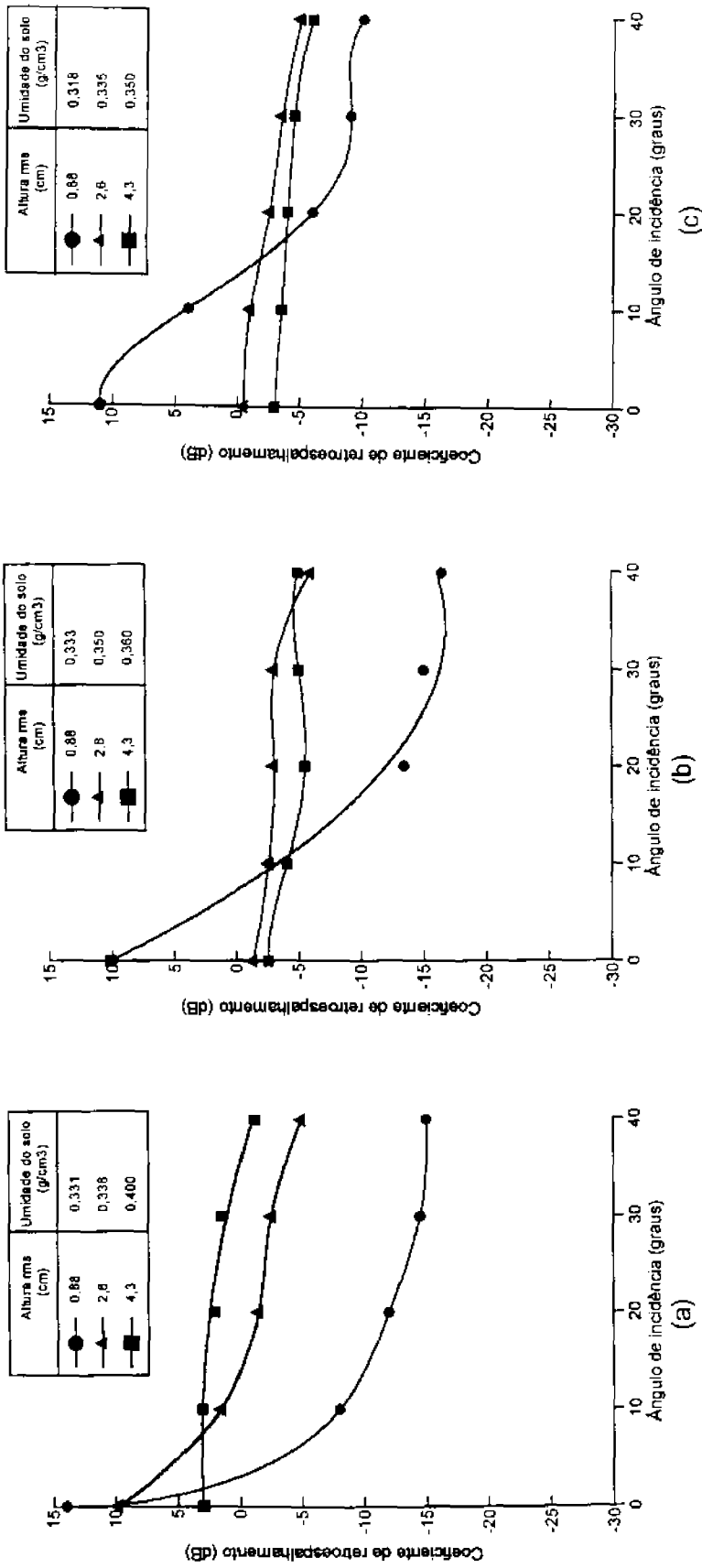


Fig. 2.4 - Resposta angular de σ^0 para campos liso (L), meio rugoso (MR) e rugoso (R) com oito grau de teor de umidade em (a) 2,75 GHz, (b) 5,25 GHz e (c) 7,25 GHz.
 FONTE: Ulaby e Batlivala (1976), p. 85.

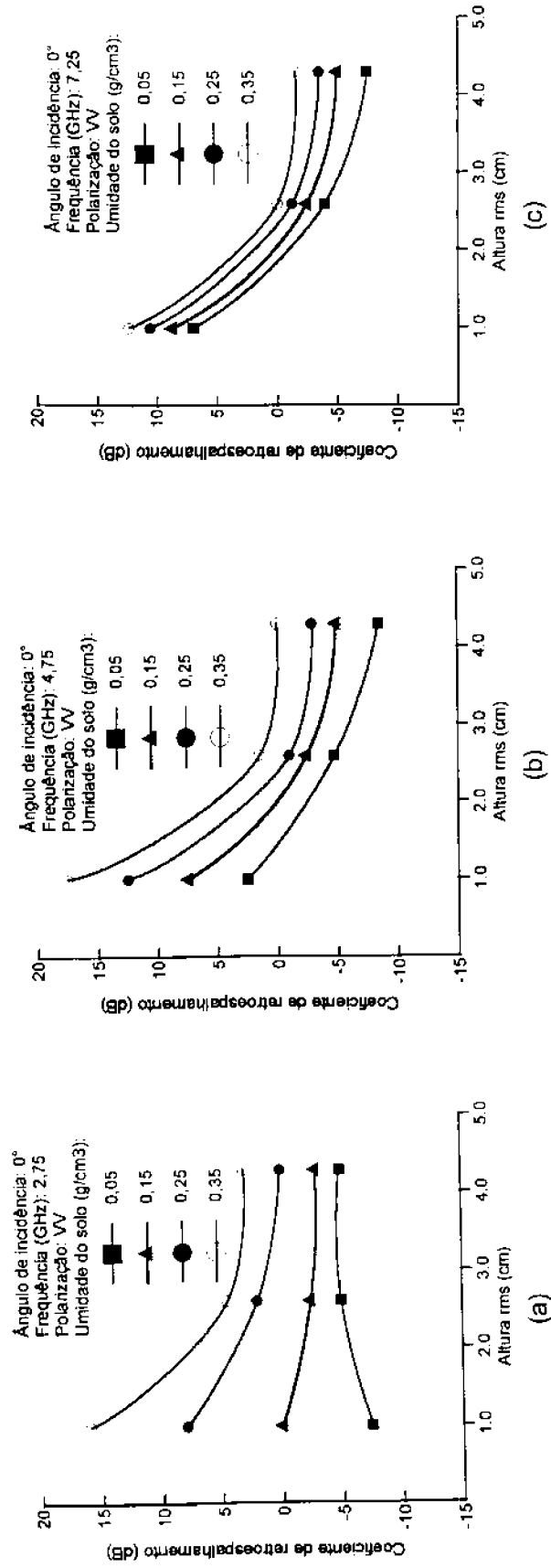


Fig. 2.5 - σ^0 como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 0° em quatro condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz
 FONTE: Adaptada de Ulaby e Batlivala (1976), p. 87.

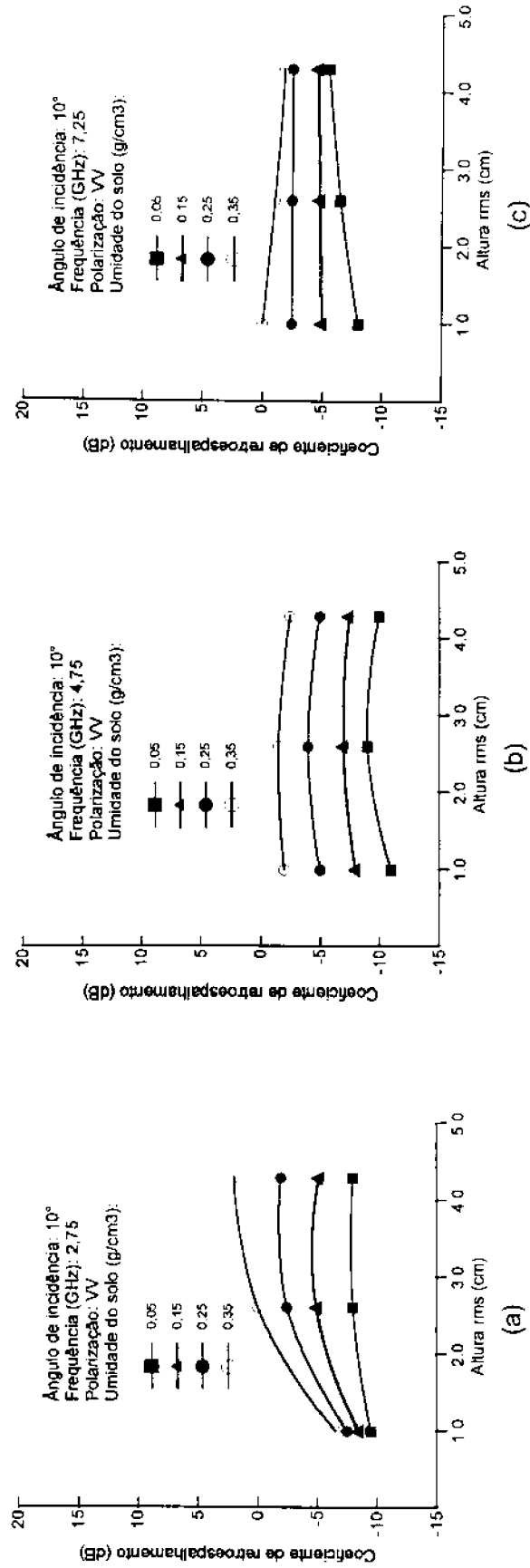


Fig. 2.6 - σ^0 como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 10° em quatro condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz
 FONTE: Adaptada de Uibay e Batlivala (1976), p. 87.

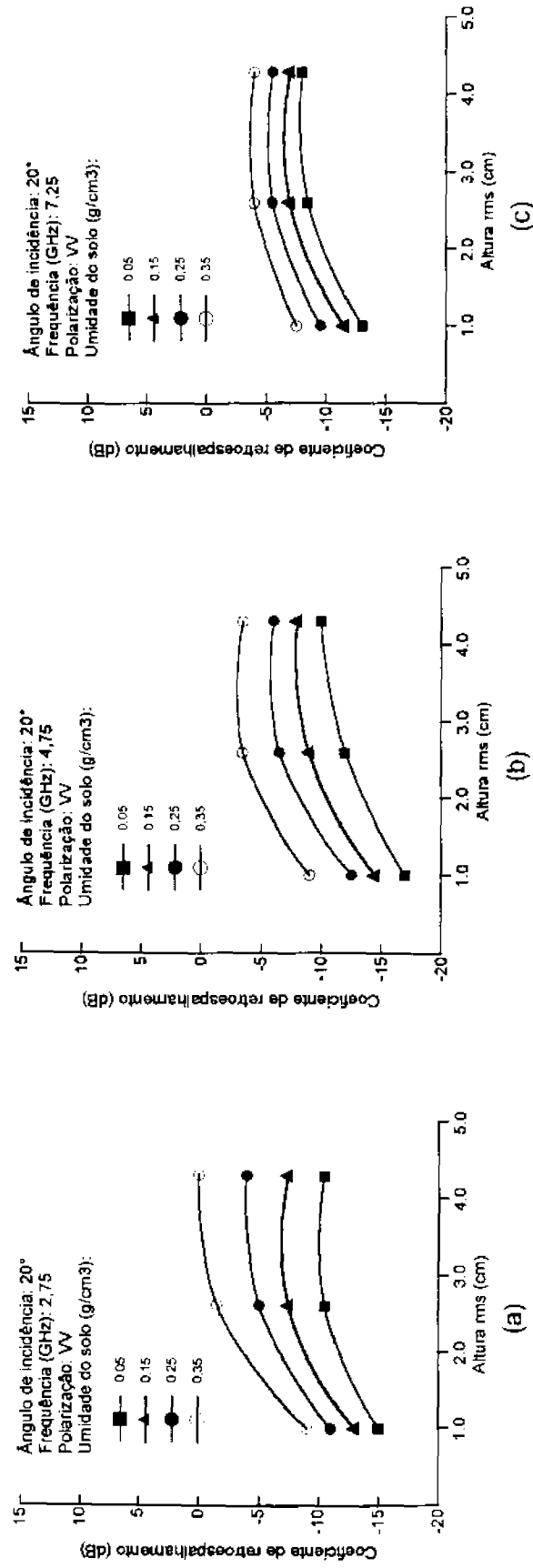


Fig. 2.7 - σ^0 como função da rugosidade da superfície para um ângulo de incidência de 20° em 4 condições de umidade (a) 2,75 GHz; (b) 4,75 GHz e (c) 7,25 GHz
 FONTE: Adaptada de Ulaby e Batlivala (1976) p. 88.

2.6.3 DEPENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA

Dobson e Ulaby (1981) observaram que σ° aumenta com o aumento da frequência para valores maiores do que 4 GHz (fig. 2.9) e que tende a oscilar quando as condições de umidade se aproximam da saturação.

Ulaby et al. (1978) plotaram a resposta espectral para σ_{hh}° para ângulos de incidência de 10° e 30°. Na Figura 2.9a, tanto as curvas de alta umidade como as de baixa umidade estavam próximas uma da outra para dois tipos de rugosidade (liso e rugoso) mostrando que para frequências maiores do que 4 GHz o σ° é indiferente a frequência.

Por outro lado, na Figura 2.9b a diferença de σ° tanto devido a rugosidade da superfície como para umidade do solo é maior ao longo do espectro de frequência. Mostrando que podemos ter uma zona de incerteza, ou seja podemos ter para um mesmo valor de σ° , um solo seco e rugoso ou úmido e liso.

2.6.4 DEPENDÊNCIA DA UMIDADE DO SOLO

Ulaby et al. (1978) mediram σ° em relação ao teor de umidade do solo a 1 cm da superfície. A correlação linear dos pontos foi obtida como mostra a Figura 2.10.

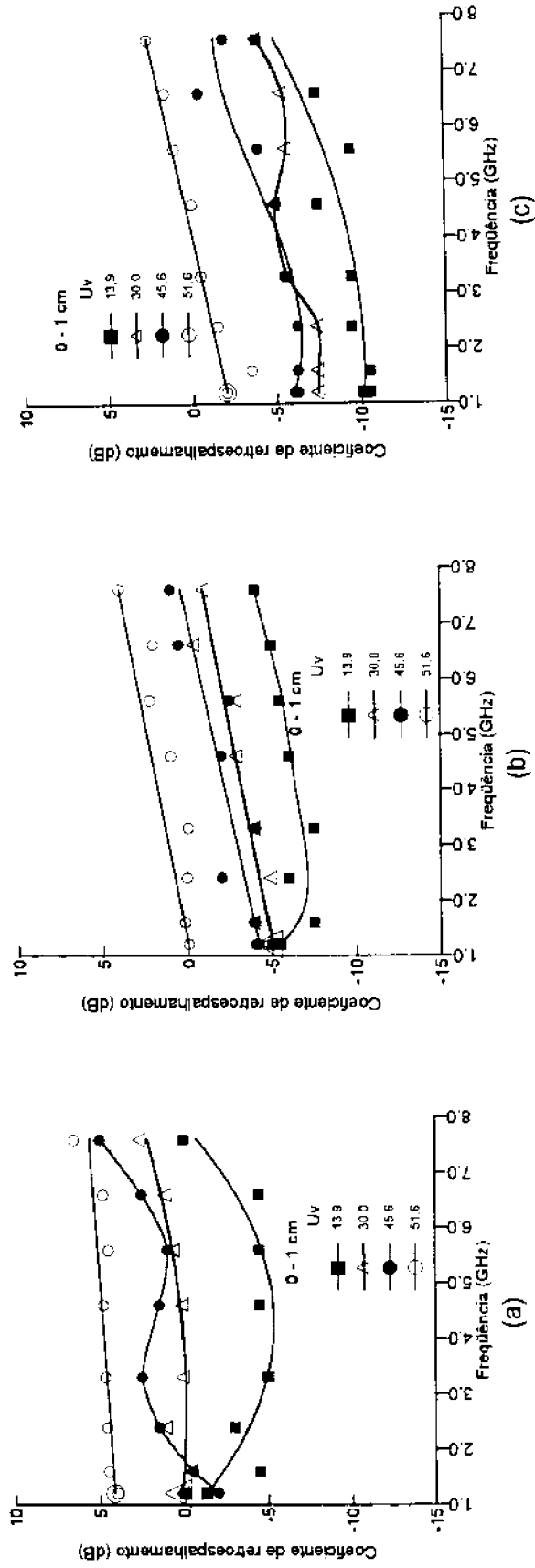


Fig. 2.8 - Resposta da frequência a σ^0 na polarização HH e ângulos de incidência de 10°, 15° e 20° para uma certa condição de umidade superficial de um solo franco argiloso siltado.

FONTE: Dobson e Ulaby (1981), p. 57.

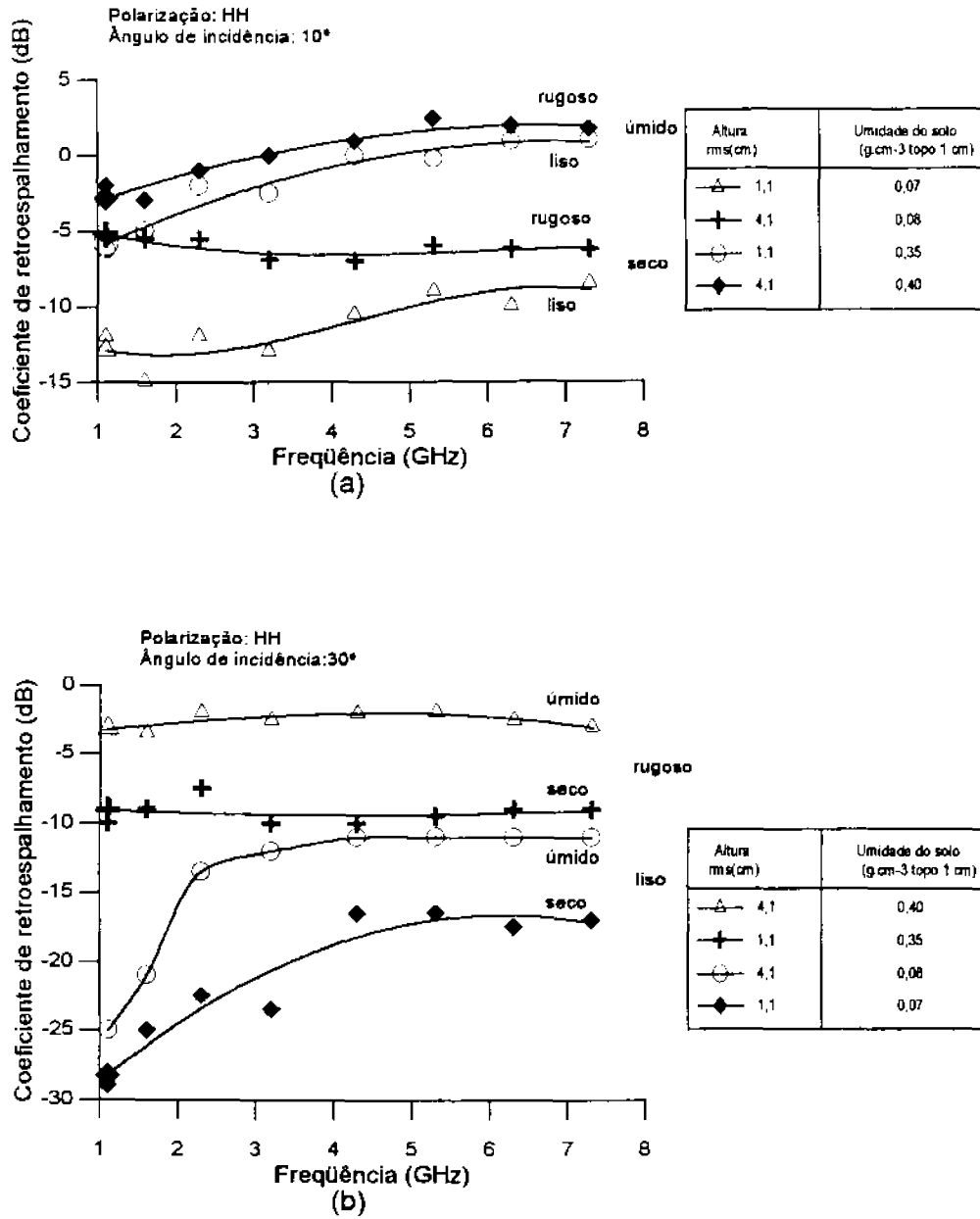


Fig. 2.9 - Resposta da frequência a σ° em vários estados de umidade e rugosidade (a) $\theta=10^{\circ}$ e (b) $\theta=30^{\circ}$.
FONTE: Ulaby et al. (1978), p.289.

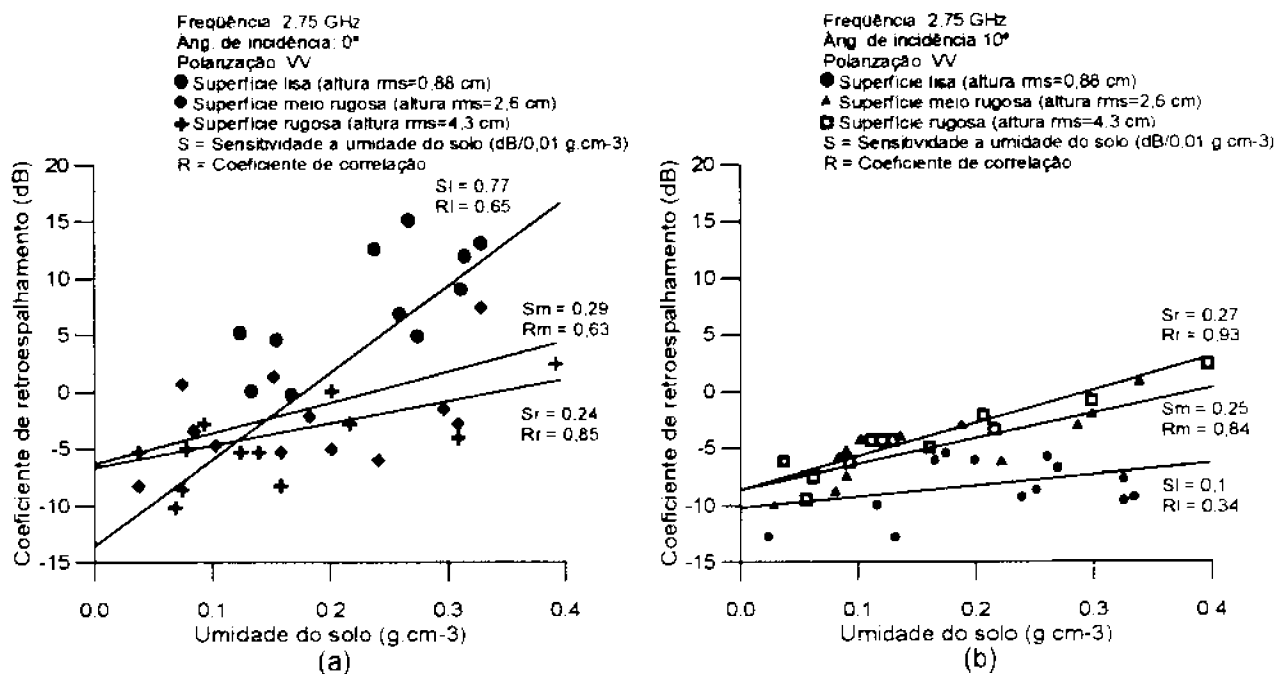


Fig. 2.10 - Resposta da umidade do solo para três perfis de rugosidade a 2,75 GHz para (a) 0° e (b) 10°.

FONTE: Ulaby e Batlivala (1976), p.86.

2.7 MODELO DE PERMITIVIDADE COMPLEXA

Hallikainen et al. (1985) chegaram empiricamente a um modelo de permitividade complexa de um solo tendo como parâmetros de entrada a umidade volumétrica, o teor de argila e areia, numa faixa de frequência de 1 a 18 GHz.

Esta expressão empírica polinomial é descrita para uma dada frequência e possui a seguinte forma

$$\epsilon = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)u_v + (c_0 + c_1S + c_2C)u_v^2 \quad (2.48)$$

onde S é a porcentagem de areia encontrada no solo

C é a porcentagem de argila encontrada no solo

u_v é a umidade volumétrica

a, b, c são coeficientes encontrados empiricamente para a frequência de 6 GHz. Este valor foi escolhido com o objetivo de ficar compatível com a frequência do SAR-ERS-1.

A tabela 2.1 apresenta valores dos coeficientes a, b e c para a parte real e a parte imaginária da permitividade complexa.

TABELA 2.1 - COEFICIENTES DA EXPRESSÃO POLINOMIAL

	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
ϵ'	1,993	0,002	0,015	38,086	-0,176	-0,633	10,720	1,256	1,522
ϵ''	-0,123	0,002	0,003	7,502	-0,058	-0,116	2,942	0,452	0,543

Este modelo polinomial de permitividade complexa apresentou uma correlação de 0,9 em relação a permitividade medida (Hallikainen, 1985).

2.8 MODELOS DE σ° PARA SOLOS EXPOSTOS

Existem vários modelos que correlacionam os parâmetros do solo e do sistema sensor com o σ° . Alguns partem de uma base teórica e outros de uma base empírica. Foram analisados cinco modelos sendo um deles escolhido (vide o tópico 4.3).

2.8.1 MODELO DE PEQUENAS PERTURBAÇÕES

Ulaby et al. (1982) apresentaram este modelo teórico. Este modelo exige que s (desvio padrão da altura da superfície) seja menor que 5% do comprimento de onda incidente. Parte-se da premissa que uma onda plana polarizada horizontalmente incide sobre uma superfície levemente rugosa.

No resultado final deste desenvolvimento, obtém-se o coeficiente de espalhamento biestático, tanto para a onda polarizada verticalmente como para a polarizada horizontalmente.

Neste estudo, nos interessa o caso de retroespalhamento (caso monoestático), supondo que o meio incidente possua μ_r (permeabilidade magnética relativa) igual a 1.

Neste caso teremos

$$\sigma^0 = 8k^4 s^2 \cos^4 \theta |\alpha_{pq}|^2 W(2k \sin \theta, 0) \quad (2.49)$$

$$\alpha_{hh} = R_{per} \quad (2.50)$$

$$\alpha_{vv} = (\epsilon_r^* - 1) [\sin^2 \theta - \epsilon_r^* (1 + \sin^2 \theta)] / [\epsilon_r^* \cos \theta + (\epsilon_r^* - \sin^2 \theta)^{1/2}]^2 \quad (2.51)$$

$$\alpha_{hv} = \alpha_{vh} = 0 \quad (2.52)$$

onde

k é o número de onda

s desvio padrão da altura da superfície

θ ângulo de incidência

α_{pq} são as amplitudes de polarização

pq assume hh, vv, hv, vh

$W(2k\text{sen}\theta, 0)$ é o espectro de rugosidade (a transformada de Fourier da função de autocorrelação)

ϵ_r^* é a permitividade complexa relativa

R_{per} é o coeficiente de reflexão de Fresnel para polarização horizontal.

As restrições para este modelo são as seguintes

$$ks < 0,3 \quad (2.53)$$

$$m < 0,3 \quad (2.54)$$

onde s é o desvio padrão da altura da superfície, m é a derivada raiz quadrática média ("rms slope") e pode ser definido como $\sqrt{2}(s/\ell)$ sendo o coeficiente PHC.

Para o espectro de rugosidade foi suposta a forma gaussiana da função de autocorrelação. Teremos então

$$W(2k \text{ sen } \theta) = \frac{1}{2} \ell^2 \exp[-(k\ell \text{ sen } \theta)^2] \quad (2.55)$$

2.8.2 MODELO DE ESPALHAMENTO DE KIRCHHOFF

Este modelo de Kirchhoff possui duas abordagens. Uma delas faz a aproximação escalar conhecida

como óptica física (physical optics) e a outra faz uma aproximação de fase estacionária - óptica geométrica (geometrics optics). Ambos os modelos foram descritos por Ulaby et al. (1982) e Beckmann e Spizzichino (1963). A teoria é aplicável a superfícies com ondulações moderadas cuja dimensão horizontal média é grande comparada com o comprimento de onda incidente.

O modelo de Kirchhoff apresenta as seguintes condições de validade

$$k\ell > 6 \quad (2.56)$$

$$\ell^2 > 2,76 s\lambda$$

onde k é o número de onda

ℓ é o coeficiente phc

s é a altura rms

λ é o comprimento de onda

2.8.2.1 ÓPTICA FÍSICA

Esta abordagem do modelo de Kirchhoff é utilizado para superfícies com uma inclinação pequena e um desvio padrão da altura da superfície médio ou pequeno. Ou seja $m < 0,25$.

Ulaby et al. (1982) apresentam o coeficiente de espalhamento completo como

$$\sigma_{pp}^0 = \sigma_{pp}^0 + \sigma_{pn}^0 + \sigma_{pn}^0 \quad (2.57)$$

Então teremos,

$$\sigma_{ppn}^0 = \left(|R_{pp}| k \ell \cos \theta \right)^2 \exp(-k_0) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_0^n}{n!n} \exp\left[-\frac{(k \ell \sin \theta)^2}{n} \right] \quad (2.58)$$

$$\sigma_{pps}^0 = 8 \sin \theta (k^2 s \ell \cos \theta)^2 \exp(-k_0) \cdot \left[|R_{pp}|^2 \sin \theta + \operatorname{re} \{ R_{pp} R_{ppl}^* \} \cos \theta \right] \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_0^{n-1}}{n!n} \exp\left[-\frac{(k \ell \sin \theta)^2}{n} \right] \quad (2.59)$$

onde $k_0 = 4k^2 s^2 \cos^2 \theta$

$$R_{pp} = R_{per0} \text{ ou } R_{par0} ,$$

e $R_{ppl} = R_{perl} \text{ ou } R_{parl}$ que são os coeficientes de reflexão de

Fresnel modificado (ver apêndice A) dependendo da escolha polarização e

σ_{ppc} é a contribuição da parte coerente

σ_{ppn} é a contribuição da parte incoerente

σ_{pps} é a contribuição da inclinação da superfície

sendo que a parte coerente pode ser desprezada se ks for grande.

θ é o ângulo de incidência.

ℓ é o coeficiente PHC.

s é a altura rms.

2.8.2.2 ÓPTICA GEOMÉTRICA

Este modelo é válido para superfícies com grande s (desvio padrão da altura da superfície) e é utilizado quando o ângulo de incidência varia em torno do nadir.

Temos então para o caso do retroespalhamento segundo Ulaby et al. (1982)

$$\sigma_{ppn}^0 = |R_{pp}(0)|^2 \exp(-\tan^2 \theta / 2m^2) / 2m^2 \cos^4 \theta \quad (2.60)$$

onde

m é a derivada rms

θ é o ângulo de incidência

$R_{pp}(0)$ é o coeficiente de reflexão de Fresnel avaliada na incidência normal.

No caso, a parte coerente costuma ser desprezível em relação a parte não coerente.

As condições de validade são

$$m < 0,4$$

que para o caso gaussiano teremos $\sqrt{2}(s/\ell) < 0,4$

2.8.3 MODELO DA EQUAÇÃO INTEGRAL

O MEI (modelo da equação integral) foi idealizado com o intuito de abranger as frequências intermediárias nas quais os modelos citados anteriormente não se aplicavam.

Portanto, este modelo abrange todas as frequências, desde que a derivada rms não seja muito grande (Chen et al., 1989) ou seja menor que 0,4 (Fung e Chen, 1992) e supondo que a superfície é um dielétrico.

Cálculos feitos por Fung e Chen (1992) e Chen et al. (1989) concluem que o coeficiente de retroespalhamento pode ser dado por

$$\begin{aligned} \sigma_{pp}^0 &= \frac{k^2}{2} |f_{pp}^*|^2 \exp(-4s^2 k^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(4^2 s^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^{(n)}(2k \text{ sen } \theta, 0) \\ &+ \frac{k^2}{2} \text{re}(f_{pp}^* F_{pp}) \exp(-3k^2 s^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2s^2 k^2)^n}{n!} W^{(n)}(2k \text{ sen } \theta, 0) \quad (2.61) \\ &+ \frac{k^2}{8} |F_{pp}|^2 \exp(-2s^2 k^2 \cos^2 \theta) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(k^2 s^2 \cos^2 \theta)^n}{n!} W^{(n)}(2k \text{ sen } \theta, 0) \end{aligned}$$

onde f_{pp}^* denota complexo conjugado, re significa a parte real e os coeficientes são definidos como:

$$f_{vv} = 2R_{\text{par}} / \cos \theta \quad (2.62)$$

$$f_{hh} = -2R_{\text{per}} / \cos \theta \quad (2.63)$$

$$F_{hh} = 2 \frac{\text{sen}^2 \theta}{\cos \theta} \left[4R_{\text{par}} - \left(1 - \frac{1}{\epsilon_r^*} \right) (1 + R_{\text{par}})^2 \right] \quad (2.64)$$

$$F_{vv} = 2 \frac{\text{sen}^2 \theta}{\cos \theta} \left[\left(\frac{1 - \epsilon_r^* \cos^2 \theta}{\mu_r \epsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta} \right) (1 - R_{\text{par}})^2 + \left(\frac{1}{\epsilon_r^*} \right) (1 + R_{\text{par}})^2 \right] \quad (2.65)$$

onde $W^{(n)}(2k \text{ sen } \theta, 0)$ é o espectro de rugosidade (transformada de Fourier da função de autocorrelação)

onde R_{par} , R_{per} são os coeficientes de reflexão de Fresnel para ondas polarizadas verticalmente e horizontalmente (ver apêndice A) e

k_z é $k \cos \theta$

θ é o angulo de incidência

s é a altura rms

k é número de onda

ϵ_r^* é a permitividade complexa relativa

μ_r é a permeabilidade relativa

2.8.4 MODELO EMPÍRICO

O modelo empírico foi desenvolvido por Oh et al. (1992), num experimento envolvendo um escaterômetro nas bandas L, C e X em ângulos variando de 10° a 70°. Para medir a rugosidade, utilizaram um laser e uma sonda dielétrica para medir a constante dielétrica dos solos. A função de autocorrelação suposta era da forma gaussiana. Feitas as observações experimentais, baseado nos dados de retroespalhamento radar e no conhecimento do comportamento de espalhamento nos casos limites (p. ex. para k_s muito grande), chegaram às equações abaixo.

Seu espectro de medidas é 0,1 a 6,0 para k_s , 2,6 a 19,7 para k_l , 0,09 a 0,31 para uv (umidade volumétrica).

$$\sqrt{p} = 1 - (2\theta/\pi)^{(1/3)} \exp(-ks) \quad (2.66)$$

onde

θ é dado em radianos

Γ_0 é a refletividade de Fresnel da superfície no nadir

e o coeficiente de retroespalhamento é dado por

$$\sigma_w^0 = \frac{g \cos^3 \theta}{\sqrt{p}} [\Gamma_h + \Gamma_v] \quad (2.67)$$

onde

$$g = 0,7 [1 - \exp(-0,65(ks)^{1,8})] \quad (2.68)$$

e Γ_h e Γ_v são as refletividades de Fresnel para a polarização horizontal e vertical respectivamente.

Resumindo, apresenta-se uma tabela com as condições de validade de cada modelo.

TABELA 2.2 - CONDIÇÕES DE VALIDADE DOS MODELOS

PP	FO	GO	MEI	ME
ks < 0,3	k > 6	$\ell^2 > 2,76s$		0,1 < ks < 6,0
m < 0,3	m < 0,25	m < 0,4	m < 0,4	2,6 < kl < 19,7
		$\theta = 0^\circ$		

onde PP - Modelo de pequenas perturbações

FO - Método da óptica física

GO - Método da óptica geométrica

MEI - Modelo da equação integral

ME - Modelo empírico

s - altura rms

ℓ - coeficiente phc

m - derivada rms

O capítulo 4 mostrará por que o modelo empírico foi o escolhido neste trabalho.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Como o objetivo deste trabalho é simular o coeficiente de retroespalhamento de radar procurou-se inserir dados que fossem compatíveis com a realidade. Para isto foram gerados dados de rugosidade e de umidade superficial, para avaliar a faixa de dados de cada um desses parâmetros.

3.1.1 DADOS DE RUGOSIDADE

Foram medidos 51 perfis de superfície de solos da região de Guaira (SP), no campo da Fazenda Lagoa do Fogão; e da região entre Araras e Rio Claro, no ano de 1992.

3.1.2 DADOS DE UMIDADE VOLUMÉTRICA

Na região de Guaira, foram tomadas medidas de umidade volumétrica, justamente nos locais onde foram tomadas medidas de rugosidade. Os valores obtidos se encontram na tabela 3.1 abaixo.

TABELA 3.1 - VALORES DE UMIDADE VOLUMÉTRICA

perfil	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
uv	0,18	0,15	0,19	0,11	0,17	0,19	0,19	0,09	0,12	0,30
perfil	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
uv	0,30	0,29	0,28	0,30	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,21

os valores de umidade são dados em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$

A faixa de dados de umidade volumétrica obtida por Oh et al.(1992) foi outro ponto de apoio para inserir dados no modelo.

3.1.3 DADOS DE TIPOS DE SOLOS

Para se gerar a permitividade complexa de um solo, foi utilizado o modelo de Hallikainen, que possui como parâmetros de entrada a porcentagem de areia e argila do solo em questão.

Com o intuito de se fazer um estudo de acordo com as condições reais existentes de granulometria, foram utilizados cinco tipos de solos do Estado de São Paulo obtidos por Epiphanyo et al. (1992). Segue-se uma descrição sucinta destes tipos pedológicos.

- 1) Latossolo Roxo (LR) - região de Araras com 29% de areia e 54% de argila.
- 2) Latossolo Vermelho-Escuro (LVE) - Quadrícula de Piracicaba com 2% de areia e 60% de argila.
- 3) Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) - região de São Carlos com 68% de areia e 31% de argila.
- 4) Podzólico Vermelho-Amarelo (PVA) - Quadrícula de Guaira com 96% de areia e 3% de argila.
- 5) Podzólico Vermelho-Escuro (PVE) - Quadrícula de Campinas com 34% de areia e 35% de argila.

3.2 MÉTODOS

Segue-se uma descrição sucinta dos métodos utilizados.

3.2.1 DETERMINAÇÃO DA PERMITIVIDADE COMPLEXA

Utilizando-se do modelo de Hallikainen gerou-se, para os tipos de solos citados no anteriormente, a permitividade complexa para vários teores de umidade.

3.2.2 DETERMINAÇÃO DA RUGOSIDADE

Os parâmetros descritos anteriormente como o desvio padrão da altura da superfície (s) e o coeficiente PHC (correlation length) foram obtidos da seguinte forma:

O medidor de rugosidade (rugosímetro) escolhido consistia em uma placa de madeira compensada de 1,2m x 0,35m x 0,02m, tendo em sua extremidade uma placa mais fina de metal parafusada (Fig.3.1) de 13 cm de largura.



Fig.3.1 - Rugosímetro

Em solos um pouco mais duros foi necessária uma picareta, mas em geral fincava-se a placa facilmente, sem afetar o perfil do solo. A seguir, ajustava-se a sua posição através de um nível e uma marreta de borracha. Acertada a posição, batia-se uma foto.

Havia quatro pontos de controle, no rugosímetro, que permitiam o ajuste da escala da foto com a escala real. Os dois pontos superiores estavam distanciados entre si em 1m. A foto era digitalizada através de um programa feito em linguagem Basic e uma mesa digitalizadora. Este programa colhia os dados de perfil a cada 1 cm. Portanto para 1m obtivemos 100 pontos.

Tais valores foram processados por um pacote estatístico (Minitab), obtendo para cada perfil : um valor de altura "rms" (s) e o coeficiente PHC (ℓ).

3.2.3 MODELOS UTILIZADOS

Todos os modelos descritos no capítulo anterior foram estudados e avaliados quanto a sua validade, diante dos dados obtidos, tanto do alvo como do sistema.

3.2.4 PARÂMETROS DO ERS-1

A simulação do coeficiente de retroespalhamento de radar foi feita considerando os parâmetros do ERS-1.

O satélite ERS-1, lançado em julho de 1991 possui vários instrumentos sensores sendo o radar o mais importante. O maior dos sistemas (AMI- Instrumento de Microondas Ativo), no modo imageador, é capaz de produzir imagens de uma faixa de 100 km sobre a superfície da Terra. Este modo é também conhecido como Radar de Abertura Sintética ou modo SAR (Synthetic Aperture Radar) (Francis et al., 1991).

Este modo possui os seguintes parâmetros, que são os mais importantes para o estudo.

TABELA 3.2 - PARÂMETROS DO SENSOR AMI

BANDA	C- 5,3 GHz
POLARIZAÇÃO	VV
ÂNG. DE INCIDÊNCIA	23°

3.2.5 DIAGRAMA DE GERAÇÃO DE σ^0

Este diagrama mostra claramente a forma encontrada para simular o coeficiente de retroespalhamento de SAR-ERS-1.

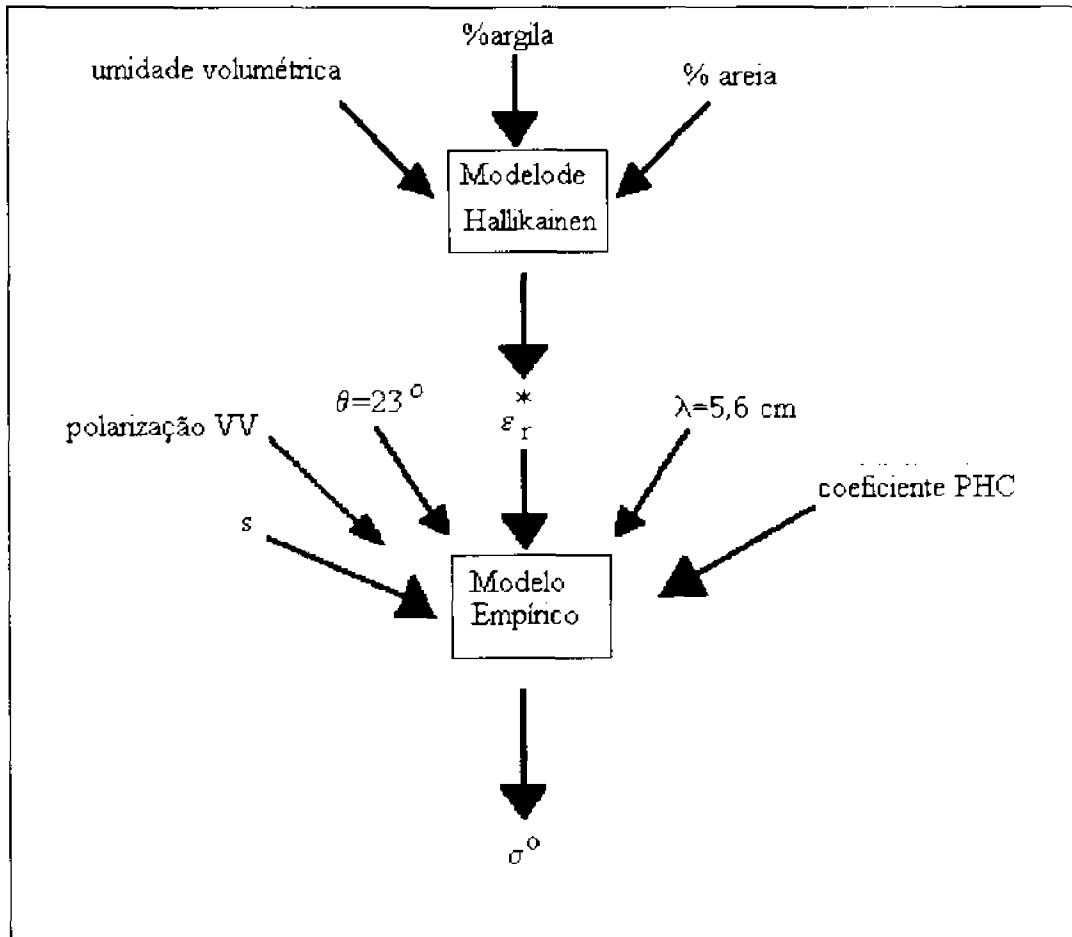


Fig. 3.2 - Diagrama de geração de σ^0

Utilizando-se do modelo de Hallikainen, e tendo como dados de entrada as porcentagens de argila e areia do tipo de solo a ser analisado e a umidade volumétrica, obteve-se o valor da permitividade complexa relativa.

Com a determinação de s e ℓ , dos perfis escolhidos, juntamente com os parâmetros do sistema ERS-1, através do modelo empírico determinou-se o coeficiente de retroespalhamento para os vários casos apresentados (σ^0 x umidade volumétrica, σ^0 x altura rms, comparação σ^0 x umidade volumétrica para todos os tipos de solos propostos).

CAPÍTULO 4
RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AVALIAÇÃO DO MODELO DE PERMITIVIDADE

O modelo de Hallikainen mostrou-se pouco sensível a mudanças de tipos de solos. Fez-se um teste com valores limites de porcentagem de areia e argila procurando avaliar a faixa de valores possíveis de permitividade (Ver tabela 4.1). Com os valores obtidos concluiu-se que a permitividade varia pouco em função dos percentuais de areia e argila.

TABELA 4.1 - VALORES DE PERMITIVIDADE

	uv=0,99		
areia(%)	0	100	0
argila(%)	0	0	100
ϵ_r'	5,5076	5,5039	5,4779
ϵ_r''	0,5760	0,5771	0,5730

uv - umidade volumétrica ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$)

Este modelo, porém, mostrou-se mais sensível a variação de umidade volumétrica como era de se esperar após uma análise rápida da expressão compreendida (ver equação 2.48) pelo modelo. Para uma variação de umidade volumétrica há uma variação de permitividade considerável quando se compara com aquela referente aos tipos de solos como mostra a Tab. 4.2

Trata-se de um resultado bastante satisfatório pois uma porção de solo mais arenoso e outro mais argiloso com a mesma umidade volumétrica, a rigor teriam a mesma permitividade complexa.

TABELA 4.2 - VALORES DE PERMITIVIDADE PARA DOIS TIPOS DE SOLOS DIFERENTES

uv	PVA		LVA	
	ϵ_r'	ϵ_r''	ϵ_r'	ϵ_r''
0,09	5,5032	0,5770	5,4959	0,5758
0,16	8,3655	1,1578	8,3506	1,1558
0,39	18,5965	3,3009	18,5615	3,2974

Palme (1986) realizou medições de permitividade complexa, obtendo um ajuste exponencial para ambas as partes real e imaginária, dependendo do tipo de solo utilizado. Os solos eram do Estado de São Paulo e as medições foram feitas em laboratório. Palme utilizou a banda X (10,6 Ghz). Utilizando o modelo de Hallikainen para esta frequência, pode-se comparar o ajuste feito por Palme e aquele autor. Plotando-se o seguinte gráfico para o tipo de solo PV₂.

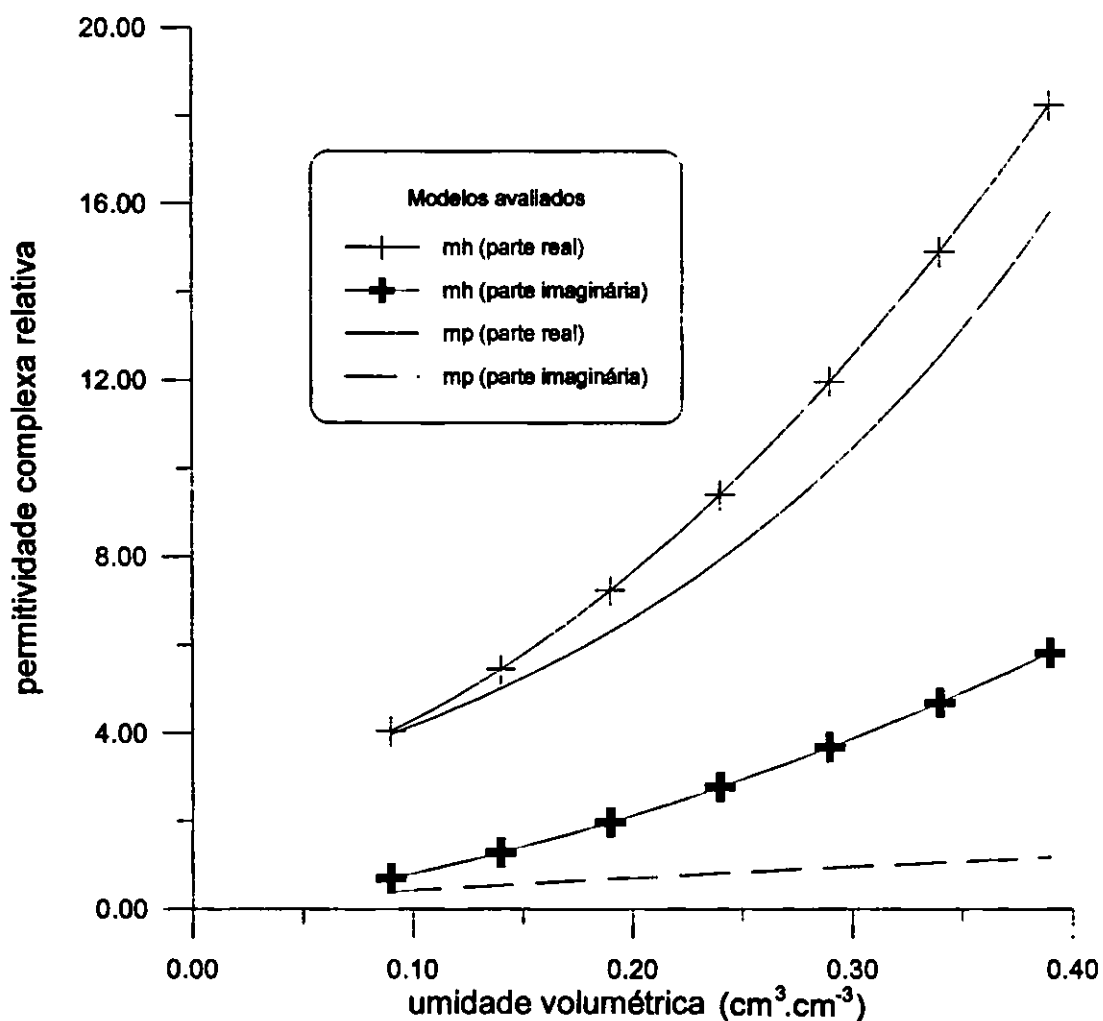


Fig. 4.1 - Comparação do Modelo de Hallikainen (mh) com o Ajuste de Palme (mp).

Note-se que há uma discrepância máxima nos seus valores, de aproximadamente 15% (no caso da parte real). Tendo-se em conta os valores, o Modelo de Hallikainen é aceitável, pois apesar da diferença de ajustes (polinomial e exponencial) seus valores caíram numa mesma faixa. A parte imaginária, neste caso, sofreu com isto, chegando na sua discrepância máxima a ser cinco vezes maior. Esta forma foi uma alternativa para se obter a permissividade complexa relativa, devido a falta de meios

experimentais para conseguir este valor para os solos, em estudo.

4.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.

A tabela 4.3 mostra os valores de desvio padrão da altura da superfície e coeficiente PHC obtidos para os vários tipos de perfis de solo estudados. Os valores de rugosidade foram obtidos conforme as equações 2.43 e 2.46 utilizando-se o pacote estatístico MINITAB.

Nota-se que s é um parâmetro bastante variável, obtendo-se valores de 0,47 a 6,67 cm. Numa mesma área (diâmetro de 300 m aproximadamente) pode-se encontrar valores até 5 vezes maiores que o menor valor. Vide os valores encontrados para os perfis r16 e r36 a r51.

A derivada rms (slope rms), m , considerada foi supondo que a função de autocorrelação tivesse uma forma gaussiana, consideração esta feita por todos os modelos.

TABELA 4.3 - VALORES DE RUGOSIDADE PARA CADA PERFIL
 AVALIADO

Perf.	s	ℓ	ks	$k\ell$	mgau	Perf.	s	ℓ	ks	$k\ell$	mgau
r1	0,47	3	0,53	3,33	0,23	r27	1,69	10	1,88	11,10	0,24
r2	0,48	8	0,54	8,88	0,09	r28	1,70	7	1,89	7,77	0,34
r3	0,61	8	0,68	8,88	0,11	r29	1,70	9	1,89	9,99	0,27
r4	0,65	10	0,73	11,10	0,09	r30	1,75	7	1,95	7,77	0,35
r5	0,67	5	0,75	5,55	0,19	r31	1,75	8	1,95	8,88	0,31
r6	0,68	4	0,76	4,44	0,24	r32	1,81	6	2,01	6,66	0,43
r7	0,76	21	0,85	23,31	0,05	r33	1,93	5	2,14	5,55	0,55
r8	0,77	7	0,86	7,77	0,16	r34	2,25	8	2,50	8,88	0,40
r9	0,81	7	0,90	7,77	0,16	r35	2,37	22	2,64	24,42	0,15
r10	0,82	8	0,91	8,88	0,14	r36	2,66	5	2,96	5,55	0,75
r11	0,83	2	0,93	2,22	0,59	r37	2,94	7	3,27	7,77	0,59
r12	0,91	8	1,01	8,88	0,16	r38	3,03	9	3,36	9,99	0,48
r13	0,96	9	1,07	9,99	0,15	r39	3,10	13	3,44	14,43	0,34
r14	1,03	9	1,14	9,99	0,16	r40	3,11	9	3,45	9,99	0,49
r15	1,08	7	1,20	7,77	0,22	r41	3,30	11	3,67	12,21	0,42
r16	1,12	3	1,24	3,33	0,53	r42	3,46	9	3,85	9,99	0,54
r17	1,20	9	1,34	9,99	0,19	r43	3,48	7	3,87	7,77	0,70
r18	1,24	9	1,38	9,99	0,19	r44	3,56	14	3,96	15,54	0,36
r19	1,26	3	1,40	3,33	0,59	r45	3,61	9	4,01	9,99	0,57
r20	1,28	8	1,42	8,88	0,23	r46	3,90	12	4,33	13,32	0,46
r21	1,34	6	1,49	6,66	0,32	r47	4,11	10	4,57	11,10	0,58
r22	1,39	7	1,54	7,77	0,28	r48	4,83	14	5,36	15,54	0,49
r23	1,48	5	1,65	5,55	0,42	r49	5,05	14	5,61	15,54	0,51
r24	1,55	7	1,72	7,77	0,31	r50	5,13	14	5,69	15,54	0,52
r25	1,59	8	1,77	8,88	0,28	r51	6,27	15	6,96	16,65	0,59
r26	1,68	14	1,86	15,54	0,17						

s é a altura rms k é o número de onda

ℓ é o coeficiente phc

mgau é a derivada rms para o caso gaussiano

Nas fotos abaixo, observa-se como variam s e l em função de seu perfil.



Fig.4.2 Perfil do solo para $s = 0,479$ e $l=3$

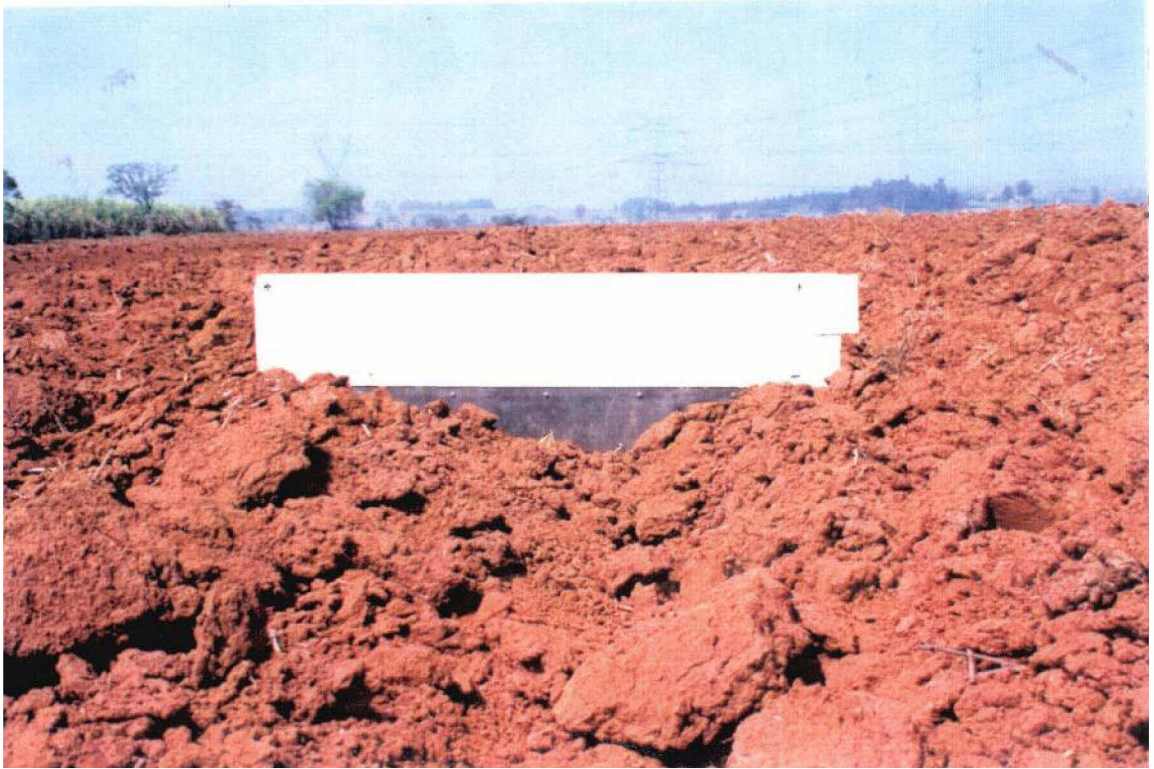
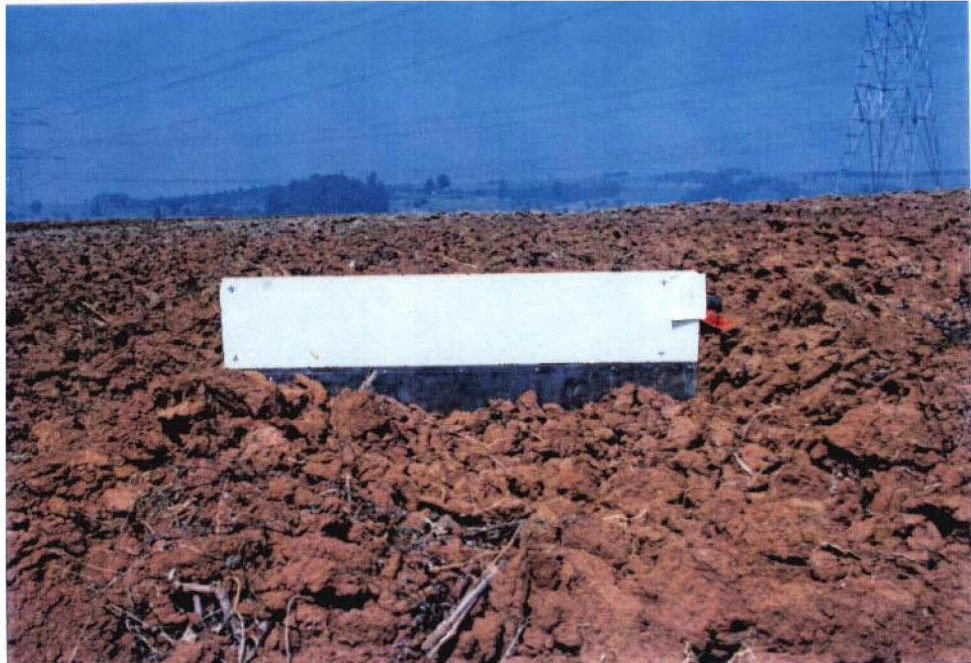
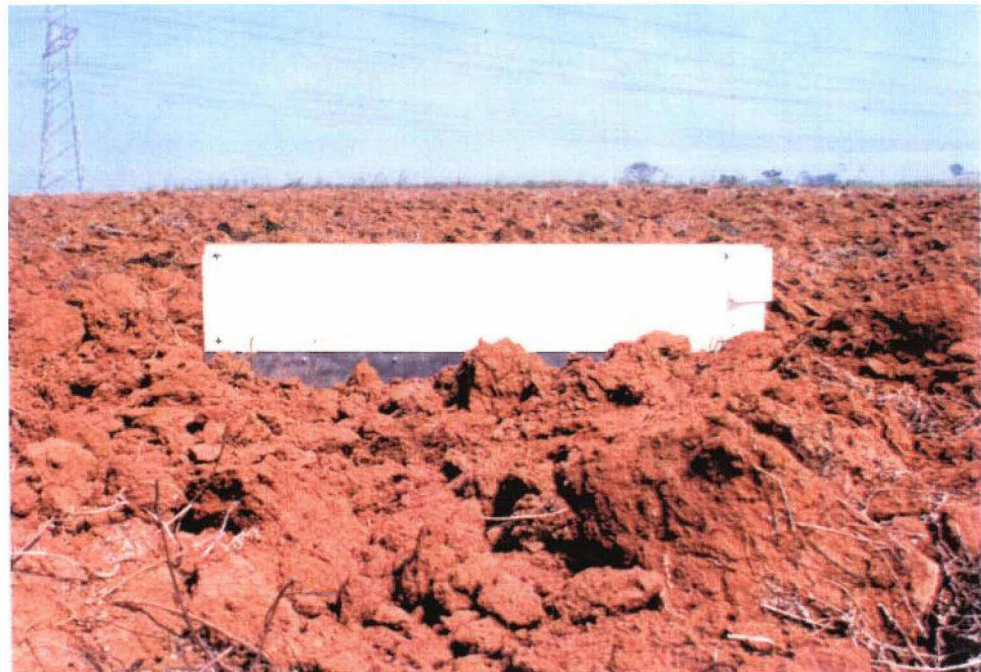


Fig.4.3 - Perfil do solo para $s=4,8$ e $l=14$

Interessante notar que pode-se ter um valor aproximado de s , porém valores totalmente diferentes de l , como se observa na figura abaixo.



(a)



(b)

Fig. 4.4 - Dois perfis de solo com o valor de s semelhante porém valores de ℓ diferentes. (a) $s=3,1$ e $\ell=13$; (b) $s=3,105$ e $\ell=9$.

Foram tiradas, no total, 51 fotos de perfis de solos, sendo que todas elas, estão disponíveis.

Os valores de coeficiente PHC (ℓ) possuem uma faixa bastante variável, de 2 a 22 cm, porém notou-se que enquanto a altura rms está relacionada com as irregularidades do perfil do solo, o coeficiente PHC relaciona-se com uma espécie de "comprimento de onda" da superfície. Quanto ℓ tende ao infinito teremos uma superfície lisa.

4.3 ESCOLHA DO MODELO

A tabela abaixo apresenta o resultado dos critérios de validade de cada um dos modelos apresentado, em relação aos diversos perfis obtidos. Critérios da tab. 2.2.

TABELA 4.4 - VALIDADE DOS MODELOS APRESENTADOS

Perfil	PP	FO	GO	MEI	ME	Perfil	PP	FO	GO	MEI	ME
r1	X	√	X	√	√	r27	X	√	X	√	√
r2	X	√	X	√	√	r28	X	X	X	√	√
r3	X	√	X	√	√	r29	X	X	X	√	√
r4	X	√	X	√	√	r30	X	X	X	√	√
r5	X	√	X	√	√	r31	X	X	X	√	√
r6	X	√	X	√	√	r32	X	X	X	X	√
r7	X	√	X	√	X	r33	X	X	X	X	√
r8	X	√	X	√	√	r34	X	X	X	√	√
r9	X	√	X	√	√	r35	X	√	X	√	X
r10	X	√	X	√	√	r36	X	X	X	X	√
r11	X	X	X	X	√	r37	X	X	X	X	√
r12	X	√	X	√	√	r38	X	X	X	X	√
r13	X	√	X	√	√	r39	X	X	X	√	√
r14	X	√	X	√	√	r40	X	X	X	X	√
r15	X	√	X	√	√	r41	X	X	X	X	√
r16	X	X	X	X	√	r42	X	X	X	X	√
r17	X	√	X	√	√	r43	X	X	X	X	√
r18	X	√	X	√	√	r44	X	X	X	√	√
r19	X	X	X	X	√	r45	X	X	X	X	√
r20	X	√	X	√	√	r46	X	X	X	X	√
r21	X	X	X	√	√	r47	X	X	X	X	√
r22	X	X	X	√	√	r48	X	X	X	X	√
r23	X	X	X	X	√	r49	X	X	X	X	√
r24	X	X	X	√	√	r50	X	X	X	X	√
r25	X	X	X	√	√	r51	X	X	X	X	X
r26	X	√	X	√	√						

√ dentro do limite de validade

X fora do limite de validade

rn=número do perfil do solo

ME = modelo empírico

PP = modelo das pequenas perturbações

FO = método da física óptica

GO = método da geometria óptica
 MEI = modelo da equação integral

Como pode-se ver pela Tabela 4.4, os modelos PP e GO não aceitaram nenhum dos perfis. Isto mostra que a restrição do PP, para s menores do que 5% do comprimento de onda, ou seja, s da ordem de 0,25 cm, torna-o inviável para solos agrícolas pois o menor s obtido foi de 0,47 (fig. 4.2). Já o GO foi descartado devido ao fato de ser aplicado apenas para ângulos de incidência próximos ao nadir o que não é o caso no ERS-1/SAR, onde $\theta = 23^\circ$.

O modelo FO aceitou 40% dos perfis e o MEI aceitou 60%, enquanto ME aceitou 94% dos perfis. Este foi o motivo da escolha do ME, pois ele abrange uma gama maior de valores de rugosidade. É interessante notar que ambos os modelos (FO e MEI) para a frequência da banda C (5,3 GHz), só aceitam s menores do que 2 cm.

Quanto ao MEI, não foi possível gerar os gráficos apresentados por Fung e Chen (1992). Nota-se que sua equação (2.61), na primeira somatória dentro do parênteses tem-se $(4^2 s^2 \cos^2 \theta)$. Fazendo uma análise dimensional em toda equação chega-se a cm^2 , o que é impossível pois a equação é adimensional. Acredita-se que esteja faltando aqui um fator de k^2 (k é o número de onda). Suas somatórias, assim como no caso de FO, convergem muito rapidamente, sendo que duas iterações já seriam suficientes. Por precaução foram feitas 10 iterações, neste trabalho.

4.4 AVALIAÇÃO DO MODELO EMPÍRICO

Utilizando-se do diagrama apresentado no tópico 3.2.4 (fig. 3.2) foi feito um programa (usando o aplicativo chamado MATLAB) para realizar todos os estudos do modelo.

Levantaram-se as curvas de σ^o x unidade volumétrica para todos os tipos de solos analisados (LR, PVA, PVE, LVA, LVE), considerando fixos os valores de k_s .

Pela figura 4.5 ficou claro que há muito pequenas diferenças entre os cinco solos avaliados, e que a análise é coerente com a avaliação feita no tópico 4.1. Por esta razão, os dados apresentados referem-se apenas ao tipo de solo LVA. Os outros dados encontram-se no apêndice B.

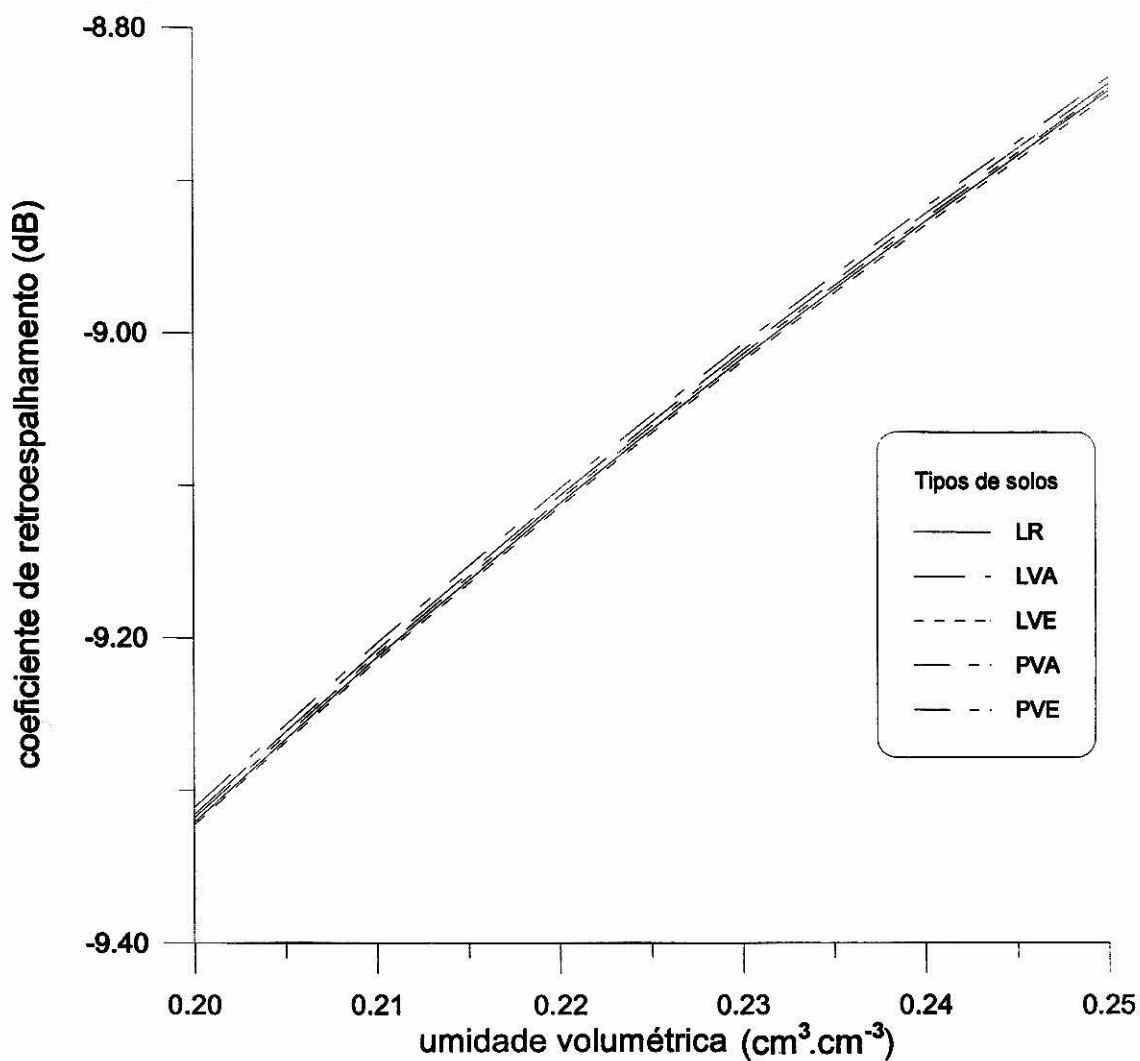


Fig. 4.5 - Comparação de σ° de 5 tipos de solos

No gráfico apresentado abaixo (fig. 4.6), nota-se que σ° cresce com o aumento de umidade volumétrica, resultado condizente com aquele apresentado por Ulaby e Batlivala (1976), conforme fig. 2.4 , deste trabalho. Nota-se, também, um aumento nos valores de σ° com o aumento da rugosidade.

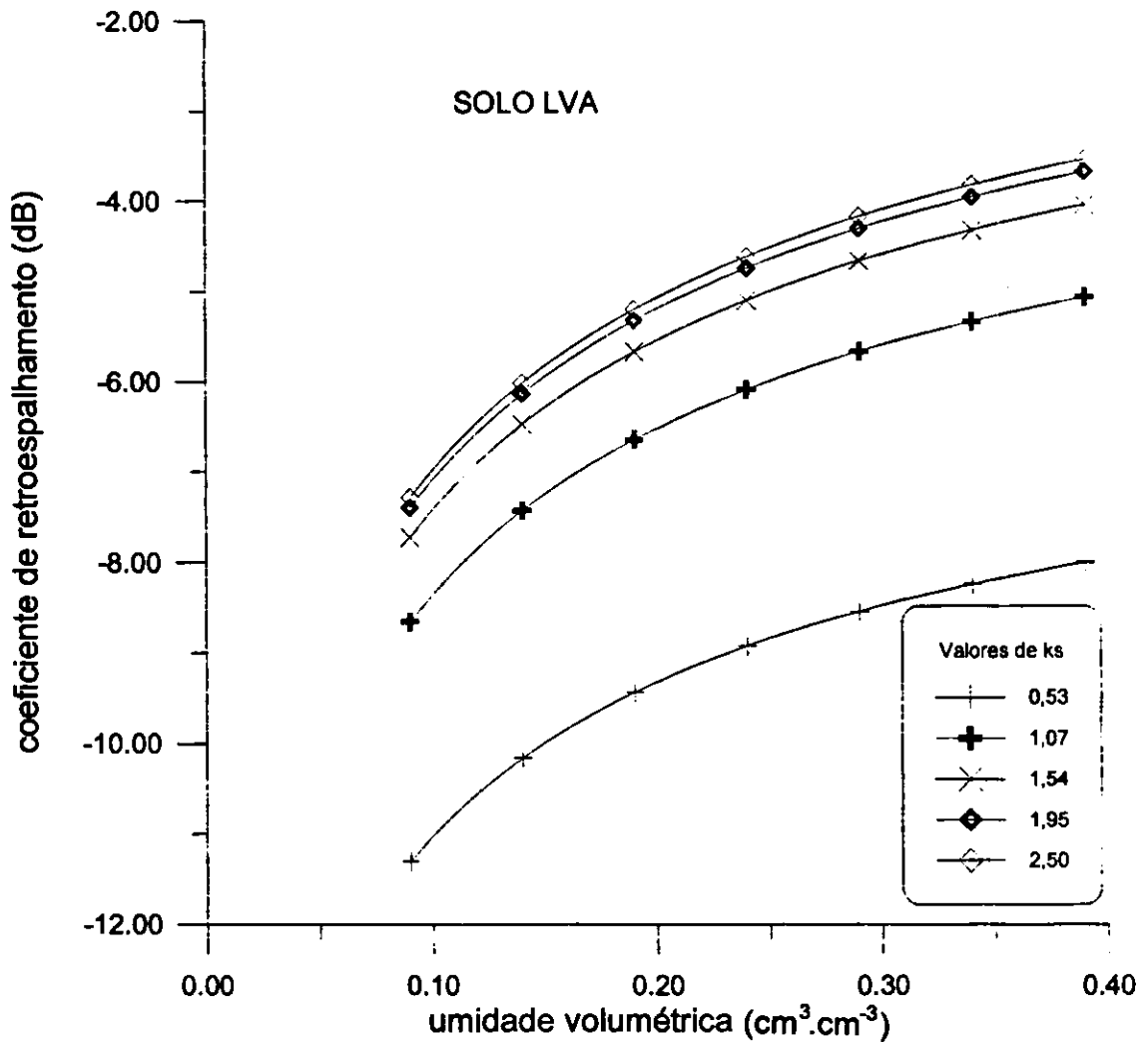


Fig. 4.6 - Valores de σ^0 em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade.

Em todos os tipos de solos analisados, este aumento ocorreu até $s=2,251$ cm ($k_s=2,5$). Para s acima deste valor, σ^0 diminuiu com o aumento de umidade, resultado que cria uma zona de incerteza. Valores de altura rms de 1,7 cm poderiam ser confundidos em termos de respostas de σ^0 , com um valor de altura rms de 5,5 cm. A figura 4.7 mostra estas relações.

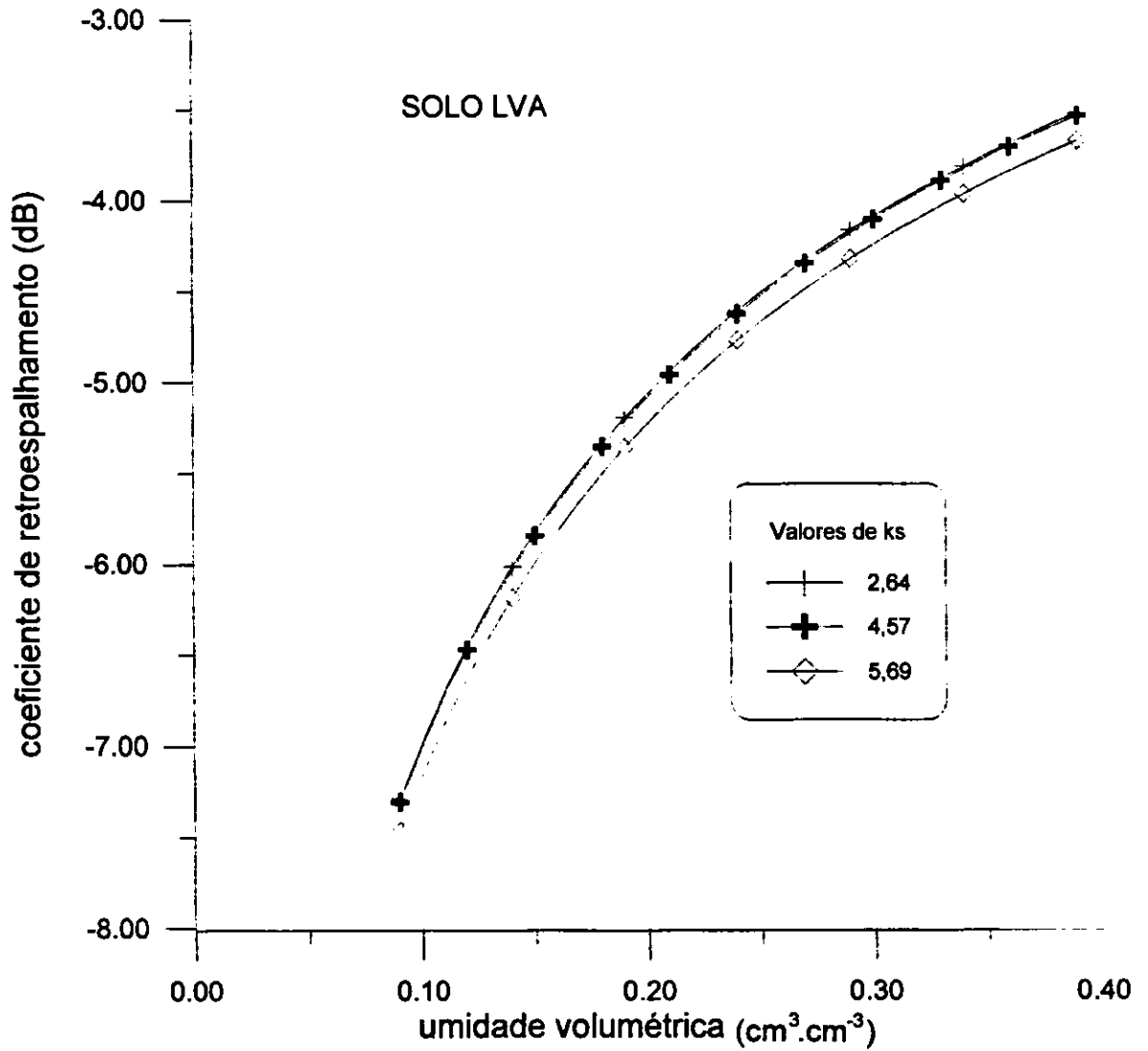


Fig. 4.7 - Valores de σ° em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade.

Levantou-se os gráficos de σ° x altura rms (s) para três tipos de umidade volumétrica (0,09;0,16 e 0,31), para todos os tipos de solos estudados.

Analisando a figura 4.8 observa-se um aumento de σ° entre $s = 0,479$ cm e $s = 2,251$ cm nos valores mostrados pela Tabela 4.5 abaixo. Verifica-se um aumento mais rápido para as curvas de maior umidade.

TABELA 4.5 - VALORES DE AUMENTO DOS VÁRIOS TIPOS DE SOLOS EM DB/CM

uv ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0,09	0,16	0,31
LVA	2,27	2,26	2,40
LVE	2,27	2,33	2,45
PVA	2,16	2,26	2,39
PVE	2,16	2,26	2,39
LR	2,16	2,26	2,39

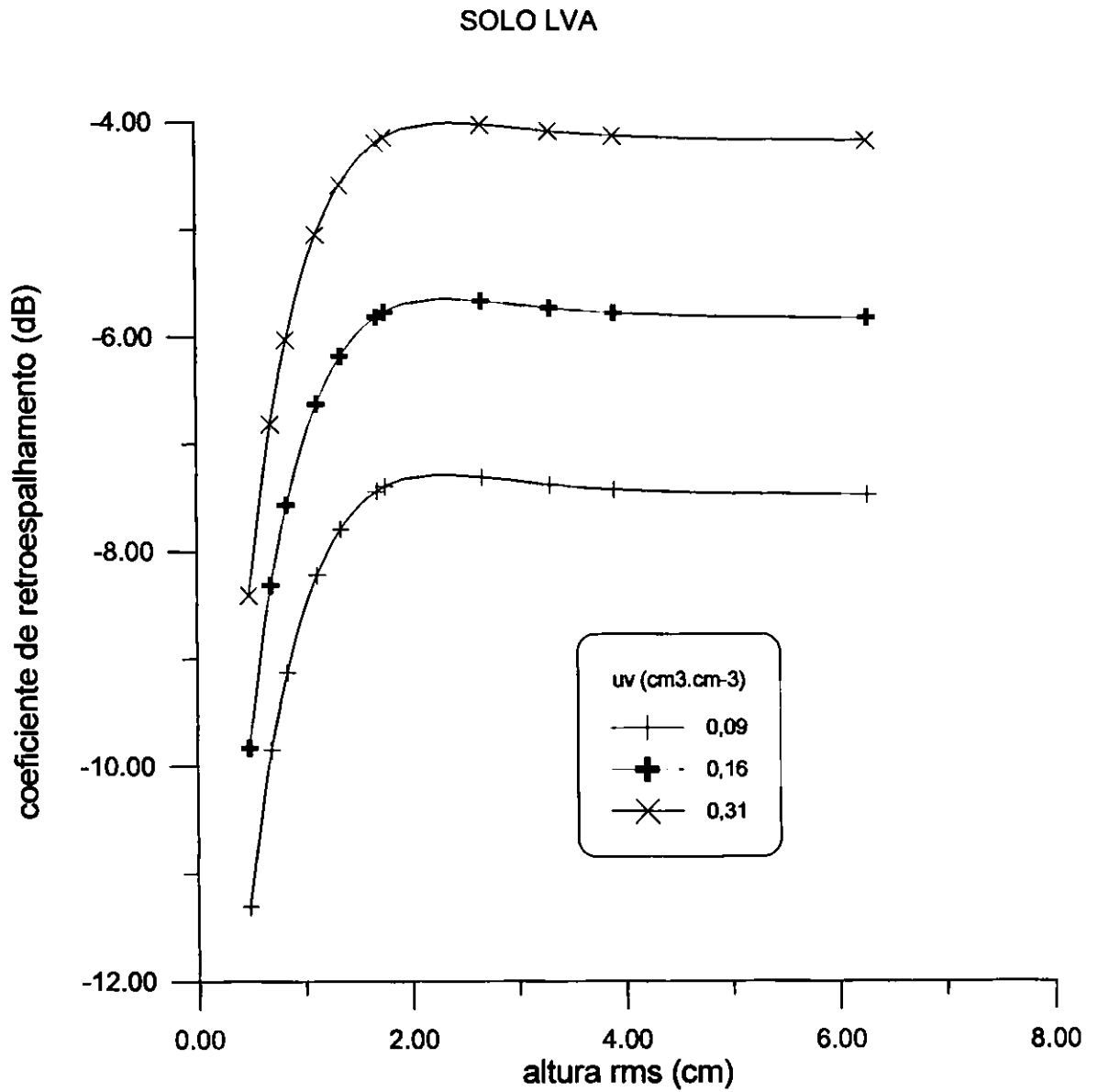


Fig. 4.8 - Valores de σ^0 em função da altura rms para 3 teores de umidade.

A partir de $s = 2,251$ cm até $s = 4$ cm, percebe-se uma pequena queda e logo a seguir o valor de σ° mantém-se constante. O resultado é coerente com aquele obtido por Ulaby e Batlivala (1976) na fig.2.7.

Pelos valores encontrados na figura 4.8, entre um solo seco ($uv=0,09$) e um solo úmido ($uv=0,31$) pode-se ter uma diferença de até 4 dB para valores de s maiores que 2,6 cm. Abaixo deste valor fica difícil diferenciar se é a umidade volumétrica ou a altura rms que está interferindo no sinal (σ°). Por exemplo, para um valor de -8 dB, pode ser responsável uma umidade alta de 0,31 ou um umidade baixa de 0,09 para uma altura rms de 0,5 e 1,5 cm respectivamente. Portanto, para s maiores do que 2,6 cm haveria possibilidades de diferenciar um solo úmido de um solo seco. Apesar de que pelos dados coletados de rugosidade (ver tabela 4.3), haver maior probabilidade dos solos agrícolas possuírem s menores do que 2,6 cm.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo de permitividade de Hallikainen é aceitável, porém há chances de ser uma fonte de erros, considerando a sua discrepância com o ajuste de Palme. Seus valores foram considerados a partir de solos de regiões temperadas e não para regiões tropicais. Os resultados sobre o modelo de Hallikainen mostraram que a permitividade possui uma dependência fraca em relação à granulometria e uma dependência forte em relação ao teor de umidade. Na falta de um reflectômetro (aparelho que mede a permitividade complexa relativa em campo), e de um laboratório para realizar as medições de permitividade, este modelo foi uma alternativa.

Os parâmetros de rugosidade do solo (altura rms e coeficiente PHC), apesar de serem uma tentativa de descrevê-lo, são muito aleatórios espacialmente e ainda totalmente sujeitos as condições impostas pelas intempéries (chuva, ventos) e ação do homem, tornando-se altamente dinâmicos temporalmente. Nenhuma correlação entre altura rms e coeficiente PHC foi encontrada.

Alguns autores ((Provesi, 1992); Oh et al., 1992), utilizaram um rugosímetro de tamanho maior, com 3m de comprimento. Neste trabalho o rugosímetro possuía 1m de comprimento. Este aumento de tamanho, melhoraria a precisão dos valores de altura rms encontrados. Outra forma de melhorar esta precisão seria diminuir o intervalo de obtenção das alturas da superfície e portanto aumentar o número de pontos (de 100 para 200 por exemplo). Poderia-se estudar melhor o papel do coeficiente PHC. Sugere-se considerar estes pontos em trabalhos futuros.

Outra consideração a ser feita diz respeito à função de autocorrelação. Ela foi assumida como gaussiana, mas poderia ter outro aspecto (exponencial ou outra forma derivada dos dados obtidos). Como a derivada rms depende desta forma, poderíamos obter maior ou menor aceitação dos perfis por parte dos modelos.

Dos modelos em geral, notou-se que todos sem exceção consideram que a permeabilidade magnética relativa seja igual a 1 ($\mu_r=1$). Sabe-se que tal hipótese é bastante plausível em solos de climas temperados, porém o fato dos nossos solos tropicais possuírem um teor de ferro elevado, o que não ocorre no hemisfério norte, poderia alterar este valor.

O modelo empírico mostrou-se satisfatório com a literatura existente. Pode-se dessa forma avaliar como o coeficiente de retroespalhamento (σ°) obtido do radar do ERS-1 se comportaria, num solo exposto. Verificou-se que para valores baixos de s ($s < 2,5$) é importante saber, no local de medição da rugosidade, a direção da visada do radar, pois constatou-se uma variação de 2 dB/cm. Para $s > 2,6$, o efeito da rugosidade sobre σ° é desprezível, dependendo mais da umidade volumétrica. Um dado curioso, neste modelo, é que o coeficiente PHC não entra no cálculo do coeficiente de retroespalhamento, apenas na limitação do modelo, o que não acontece nos outros modelos.

Utilizando-se do modelo empírico, poderia derivar-se a constante K de calibração local absoluta, para imagens PRI do ERS-1. Segundo Laur (1992) poderia ser feito em condições bem controladas como altura rms e umidade volumétrica bem conhecidas.

Finalmente, este modelo demonstrou que tanto a rugosidade como o teor de umidade do solo são parâmetros importantes, e que só se poderá avaliar o σ° da imagem

radar se um desses valores for conhecido. Caso contrário, tornar-se-á difícil distinguir a contribuição de um ou de outro.

Provesi (1992), utilizou quatro destes modelos para estudos de vegetação. Um trabalho interessante seria verificar o desempenho do modelo empírico para esta análise.

Sugere-se como próximo passo deste estudo, obter o valor de σ° através do número digital de uma imagem do ERS-1. Esta seria uma grande contribuição para a posterior classificação digital de imagens SAR e o estudo da umidade do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beckmann, P.; Spizzichino, A. **The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces.** Poland, Pergamon Press, 1963. 503p. v.3.
- Box, G.E.P.; Jenkins, G.M. Time series analysis : forecasting and control. Oakland. California, Holden-Day, 1976.
- Chen, M.F.; Chen, K.S.; Fung, A.K. A study of the validity of the integral equation model by moment method simulation - cylindrical case. **Remote Sensing of Environment** 29(4):217-228, 1989.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and soil texture: part III - soil texture. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** , GE-19(1):51-61, Jan. 1981.
- Dobson, M.C.; Ulaby, F.T. Active microwave soil moisture research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing** , GE-24(1):23-26, Jan. 1986.
- Epiphanyo, J.C.N.; Formaggio, A. R.; Valeriano, M.M.; Oliveira, J.B. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo.** São José dos Campos, Relatório de Projeto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, jun. 1992.
- Francis, R. et al. The ERS-1 spacecraft and its payload. **ESA Bulletin.** 65:27-48. Feb. 1991.

- Fung, A.K.; Chen, K.S. Dependence of the surface backscattering coefficients on roughness, frequency and polarization states. **International Journal of Remote Sensing**. 13(9):1663-1680. 1992.
- Hallikainen, M.T.; Ulaby, F.T.; Dobson, M.C.; El-Rayes, M; Wu, L. Microwave dielectric behavior of wet soil - part 1: empirical models and experimental observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-23(1):24-34, Jan., 1985.
- Kruse, P.W.; McGlauchling, L.D.; McQuistan, R.B. **Elements of infrared technology: generation, transmission, and detection**. New York, John Willey & Sons, 1963. 448p.
- Laur, R. **Derivation of backscattering coefficient σ^0 in ERS-1 SAR PRI products**. 1 ed.. Esa-ESRIN, 1992. 16 p.
- Le Toan, T. Active microwave signatures of soil and crops, significant results of three years of experiments. In: **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Munich, West Germany, 1982. New York, IEEE, 1982. p.3.1-3.5.
- Oh, Y.; Sarabandi, K; Ulaby, F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surface. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**. 30(2):370-381, Mar. 1992.

- Palme, U.W. **Caracterização radiométrica de seis solos na faixa X de microondas, através de medidas de permitividade complexa.** Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1986. 167p. (INPE-4376-TDL/302).
- Parada, L.E.M.; **Radar de medida em superfícies: uma contribuição ao estudo de sensores ativos de microondas aplicados ao sensoriamento remoto.** (Trabalho Acadêmico). Campo Montenegro, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, mar. 1992.
- Provesi, J.R. **Evaluating natural surface roughness and its statistical parameters in radar backscatter modelling.** (Doctoral Thesis) - Univ. of Sheffield, June, 1992. 660p.
- Skoinik, M.I. An introduction to radar. In: _____. **Radar Handbook.** USA, McGraw-Hill publishing company, 1990. cap.1, p.1.1-1.18.
- Ulaby, F.T.; Batlivala, P.P.; Dobson, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture and soil texture: part I - bare soil. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, GE-16(4):286-295, Jan. 1978.
- Ulaby, F.T.; Batlivala, P.P. Optimum radar parameters for mapping soil moisture. **IEEE Transactions on Geoscience electronics**, GE-14(2):81-93, Apr. 1976.

Ulaby, F.T.; Moore, R.K.; Fung, A.K. Microwave remote sensing: active and passive. Washington, D.C., Artech House, 1981. v. 1.

_. Washington, D.C., Artech House, 1982. v. 2.

_. Washington, D.C., Artech House, 1986. v. 3.

Wegmüller, U.; Matzler, C.; Schanda, E.; Microwave signatures of bare soil. **Advances in Space Research**, 4(1):307-316, Jan. 1989.

APÊNDICE A
COEFICIENTES DE REFLEXÃO DE FRESNEL

$$R_{\text{per}} = \frac{\mu_r \cos \theta - (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}}{\mu_r \cos \theta + (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}} \quad (\text{A.1})$$

$$R_{\text{par}} = \frac{\varepsilon_r^* \cos \theta - (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}}{\varepsilon_r^* \cos \theta + (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}} \quad (\text{A.2})$$

$$R_{\text{perl}} = \frac{[\mu_r \cos \theta - (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}] (\mu_r \text{sen} \theta + \text{sen} \theta)}{[\mu_r \cos \theta + (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2}] (\mu_r \cos \theta + (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2})} \quad (\text{A.3})$$

$$R_{\text{par}} = \frac{\left[\text{sen} \theta - \frac{\text{sen} \theta}{\varepsilon_r^*} - \frac{(\varepsilon_r^* \cos \theta - (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2})}{(\varepsilon_r^* \cos \theta + (\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)^{1/2})} \left(\text{sen} \theta + \frac{\text{sen} \theta}{\varepsilon_r^*} \right) \right]}{\cos \theta + \frac{(\mu_r \varepsilon_r^* - \text{sen}^2 \theta)}{\varepsilon_r^*}} \quad (\text{A.4})$$

$$\Gamma_0 = |R_{\text{per}}(\theta = 0, \mu_r = 1)|^2 = \left| \frac{1 - (\varepsilon_r^*)^{1/2}}{1 + (\varepsilon_r^*)^{1/2}} \right|^2 \quad (\text{A.5})$$

$$\Gamma_h = |R_{\text{per}}|^2 \quad (\text{A.6})$$

$$\Gamma_v = |R_{\text{par}}|^2 \quad (\text{A.7})$$

APÊNDICE B

GRÁFICOS DOS SOLOS LR, LVA, PVA E PVE

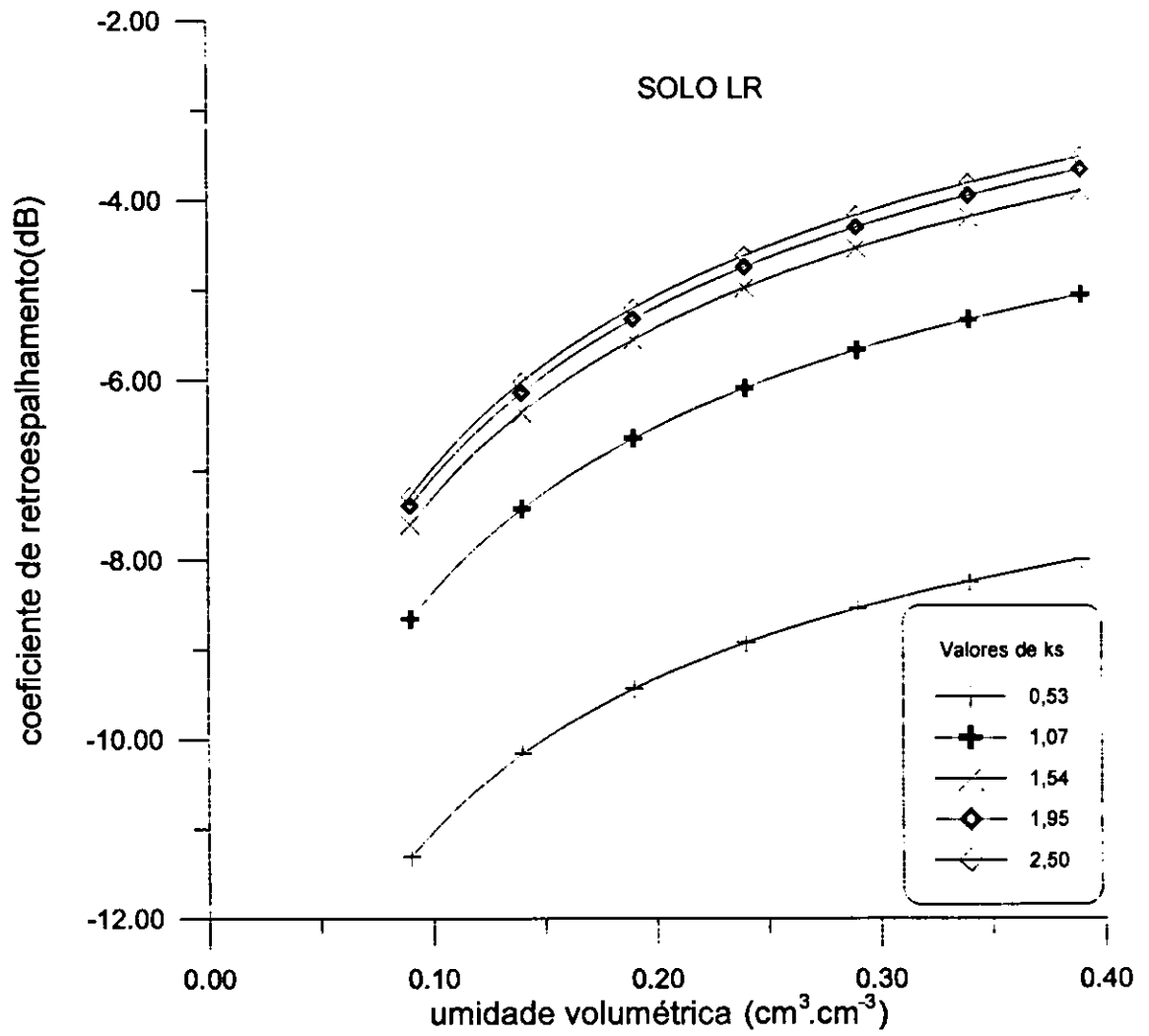


Fig. B.1 - Valores de σ^0 em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade.

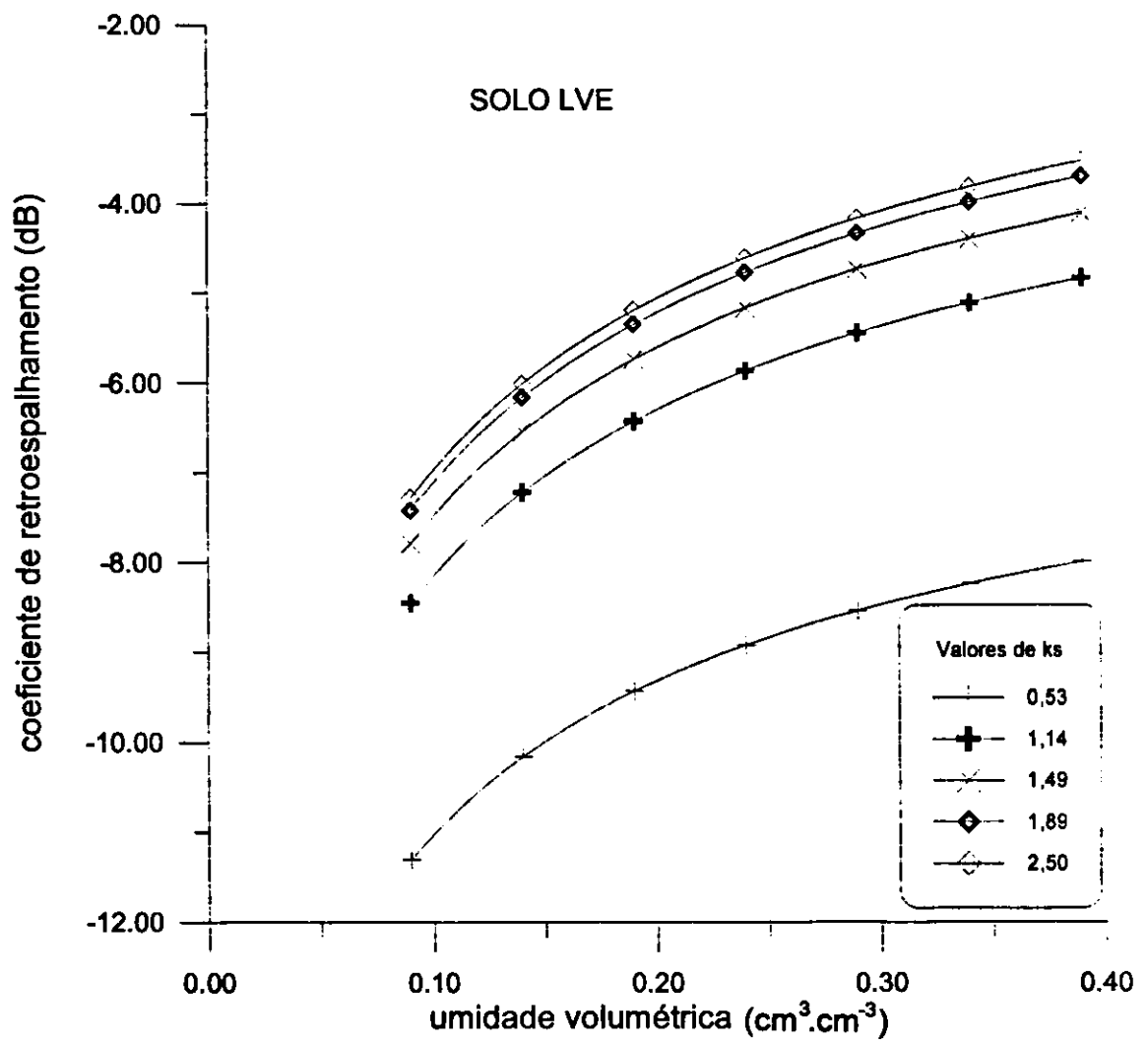


Fig. B.2 - Valores de σ^o em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade.

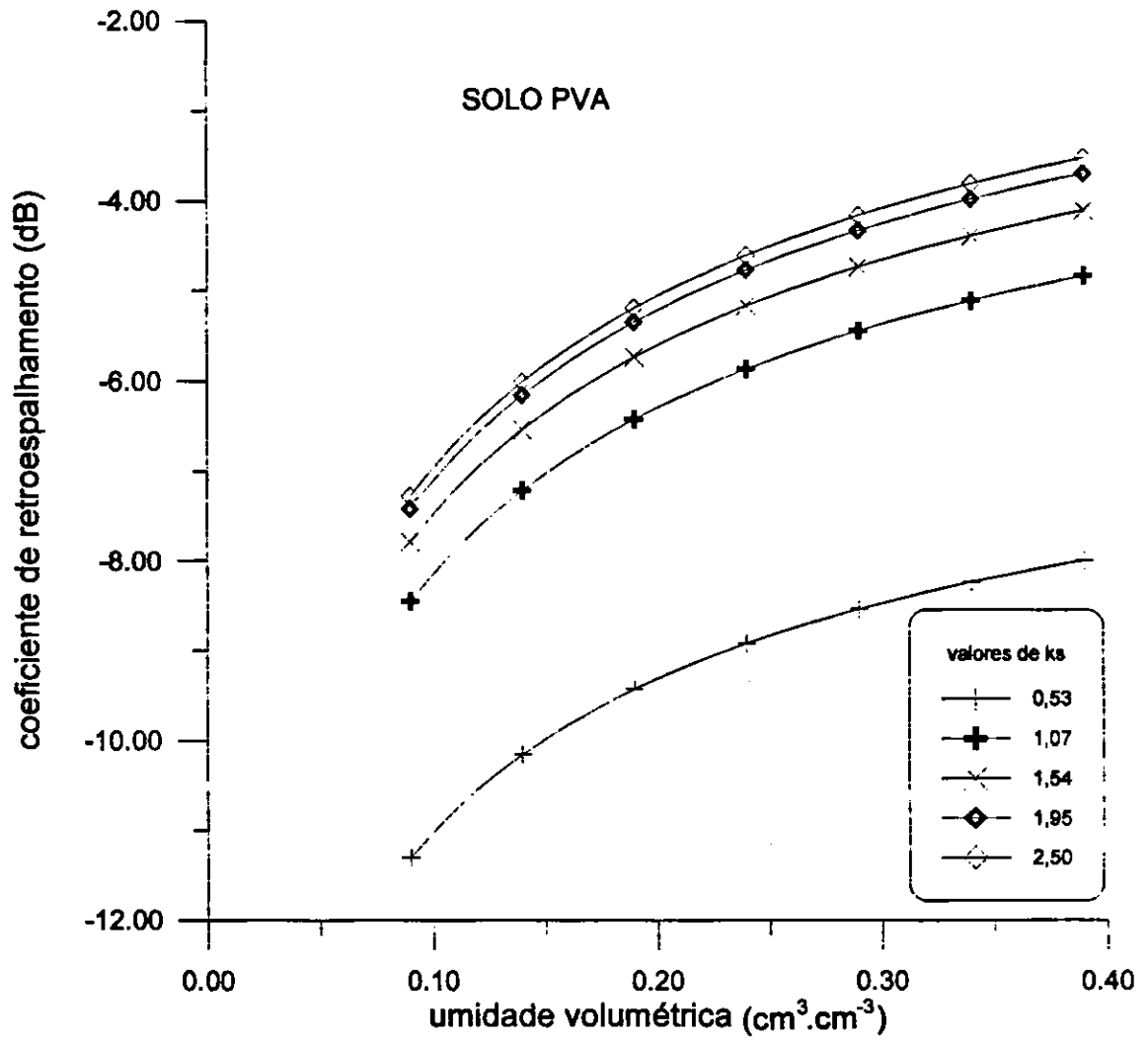


Fig. B.3 - Valores de σ° em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade.

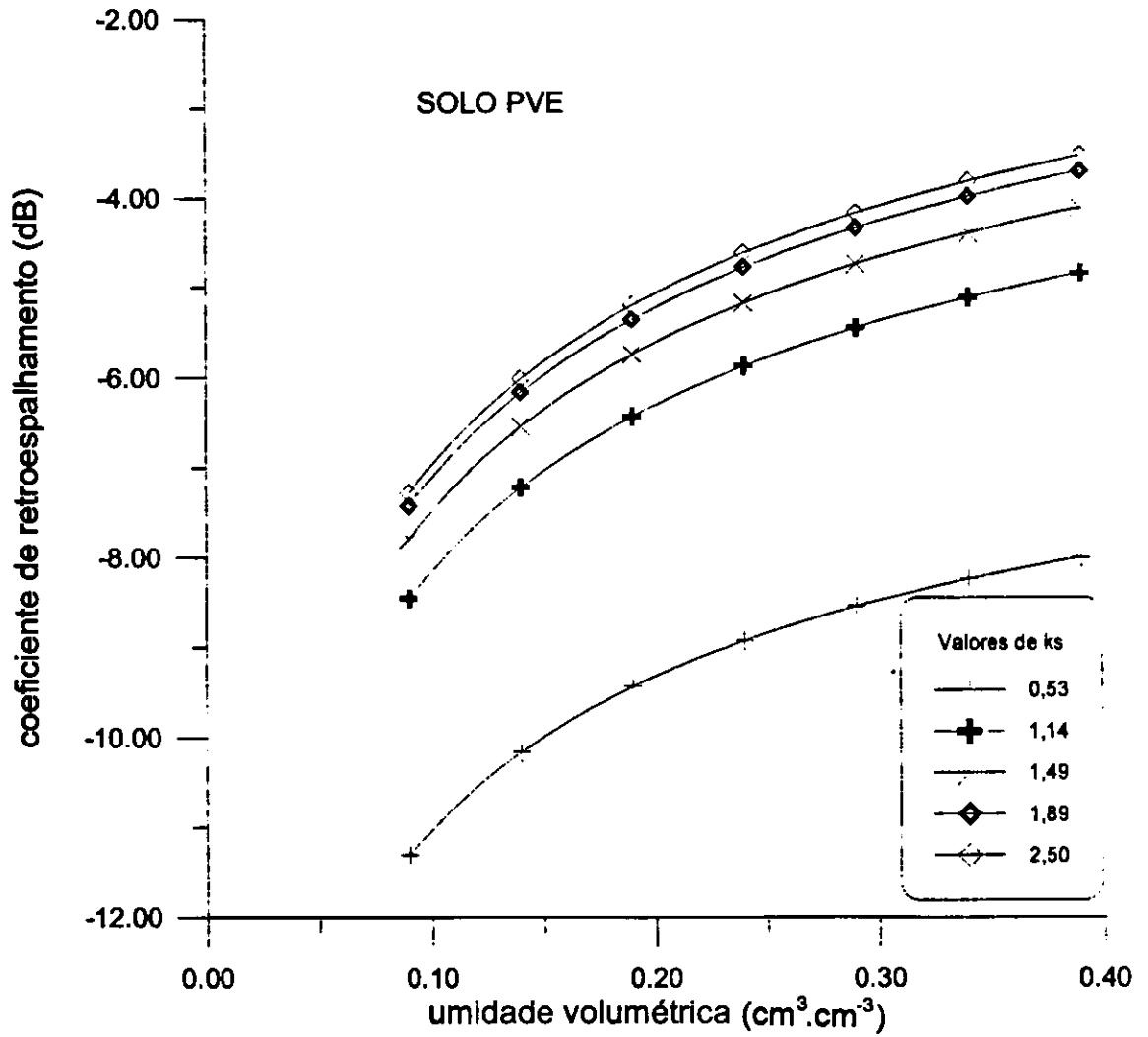


Fig. B.4 - Valores de σ° em função da umidade volumétrica para 5 tipos de rugosidade.

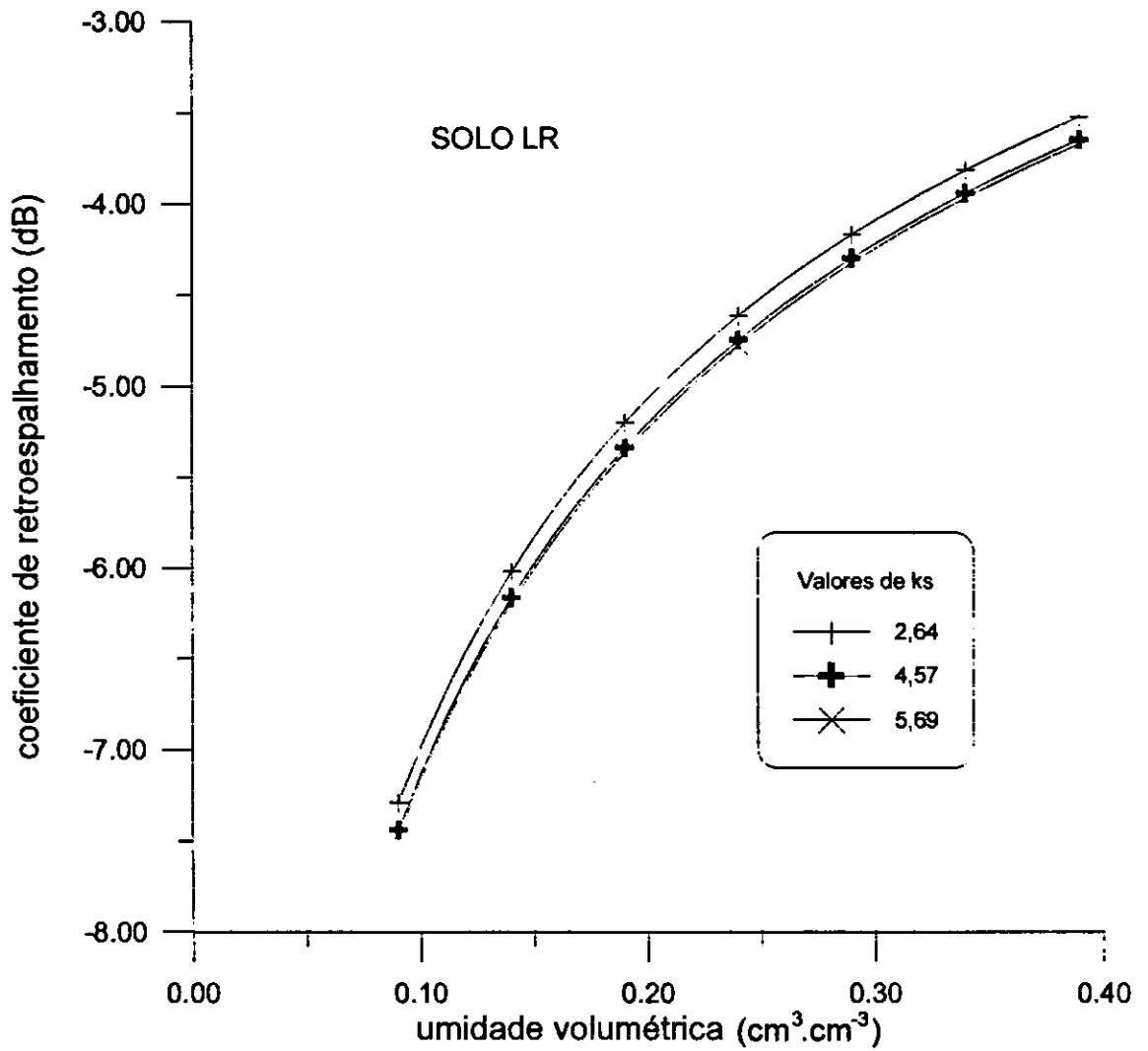


Fig. B.5 - Valores de σ^0 em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade.

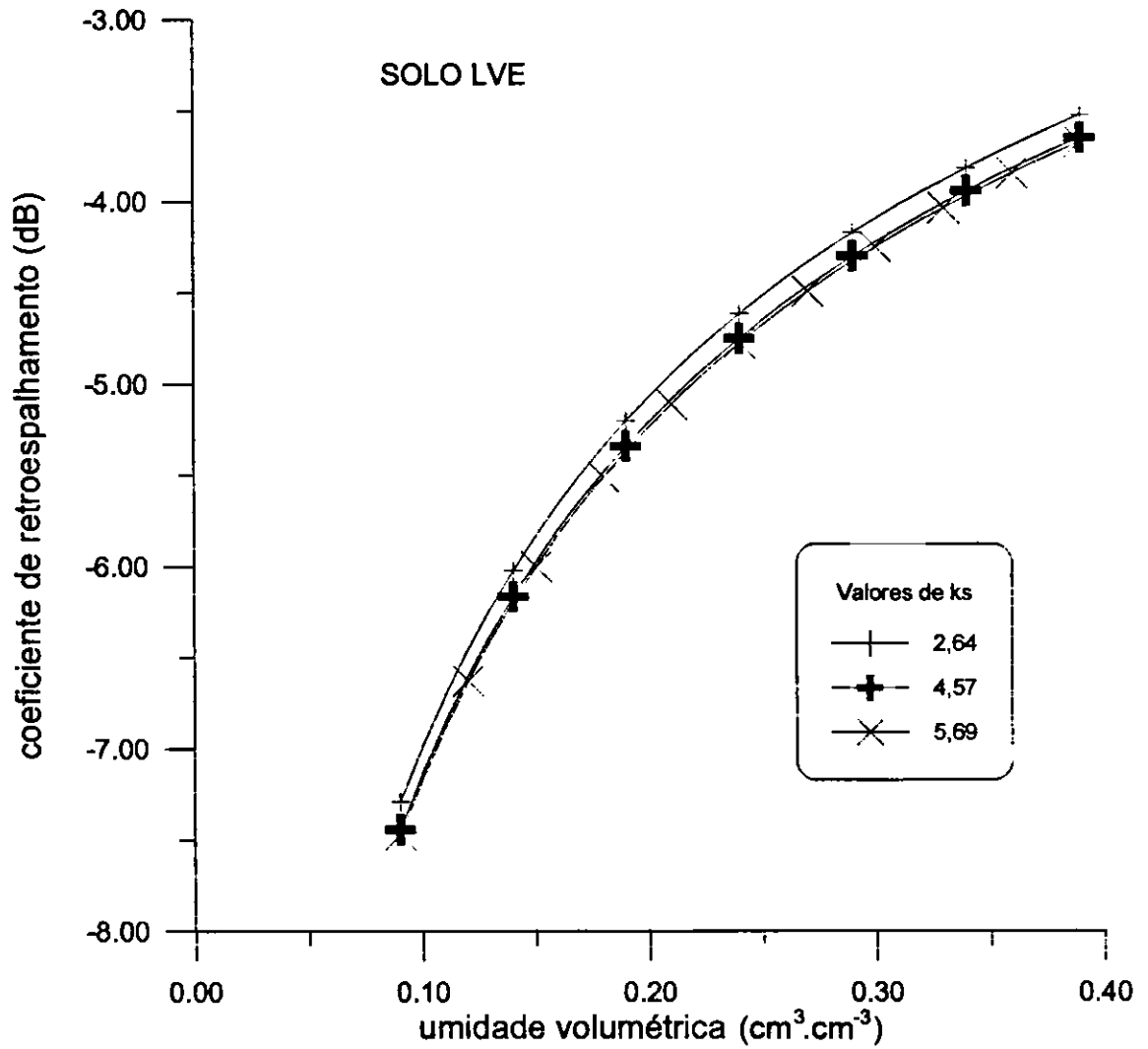


Fig. B.6 - Valores de σ^0 em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade.

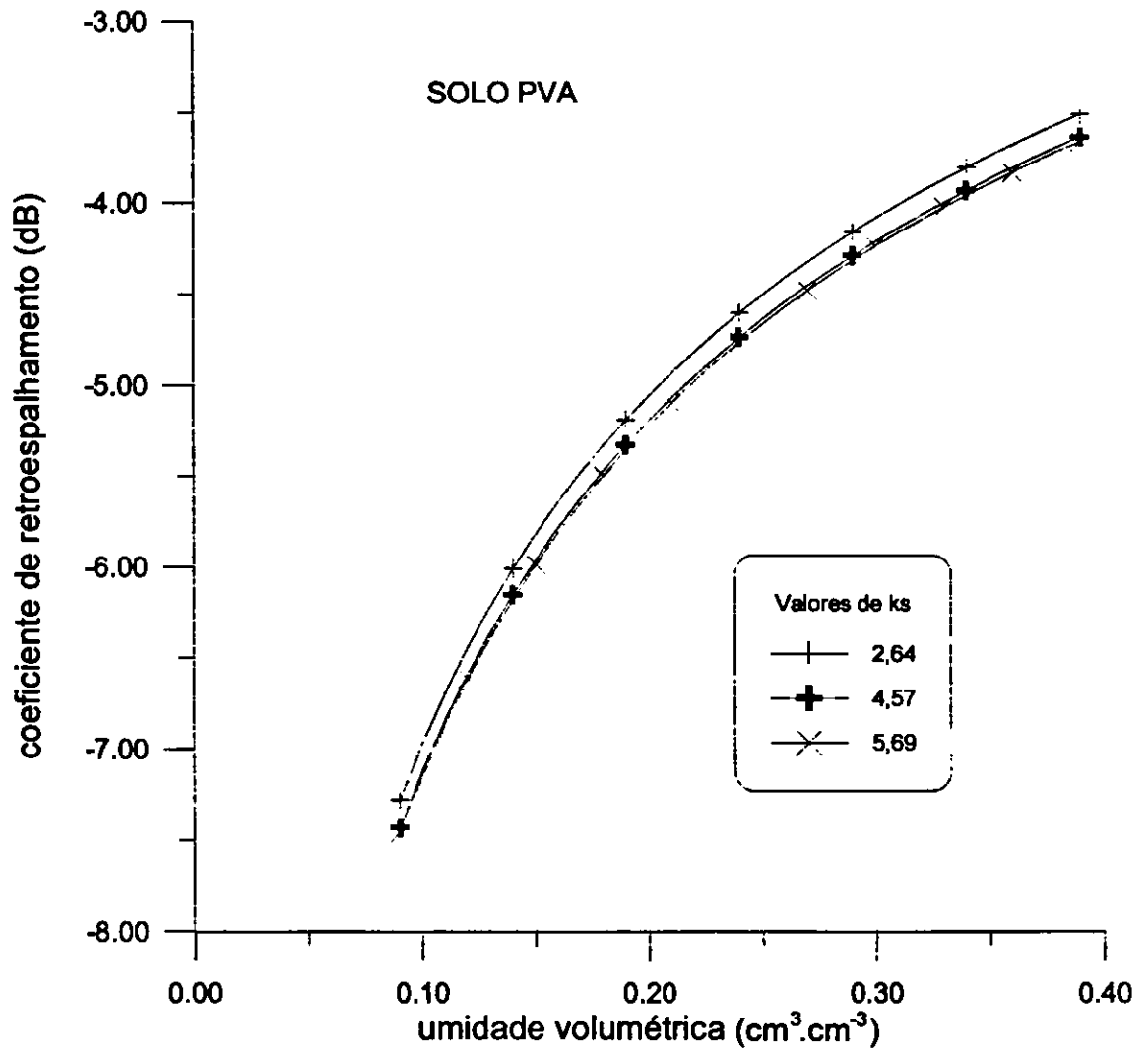


Fig. B.7 - Valores de σ° em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade.

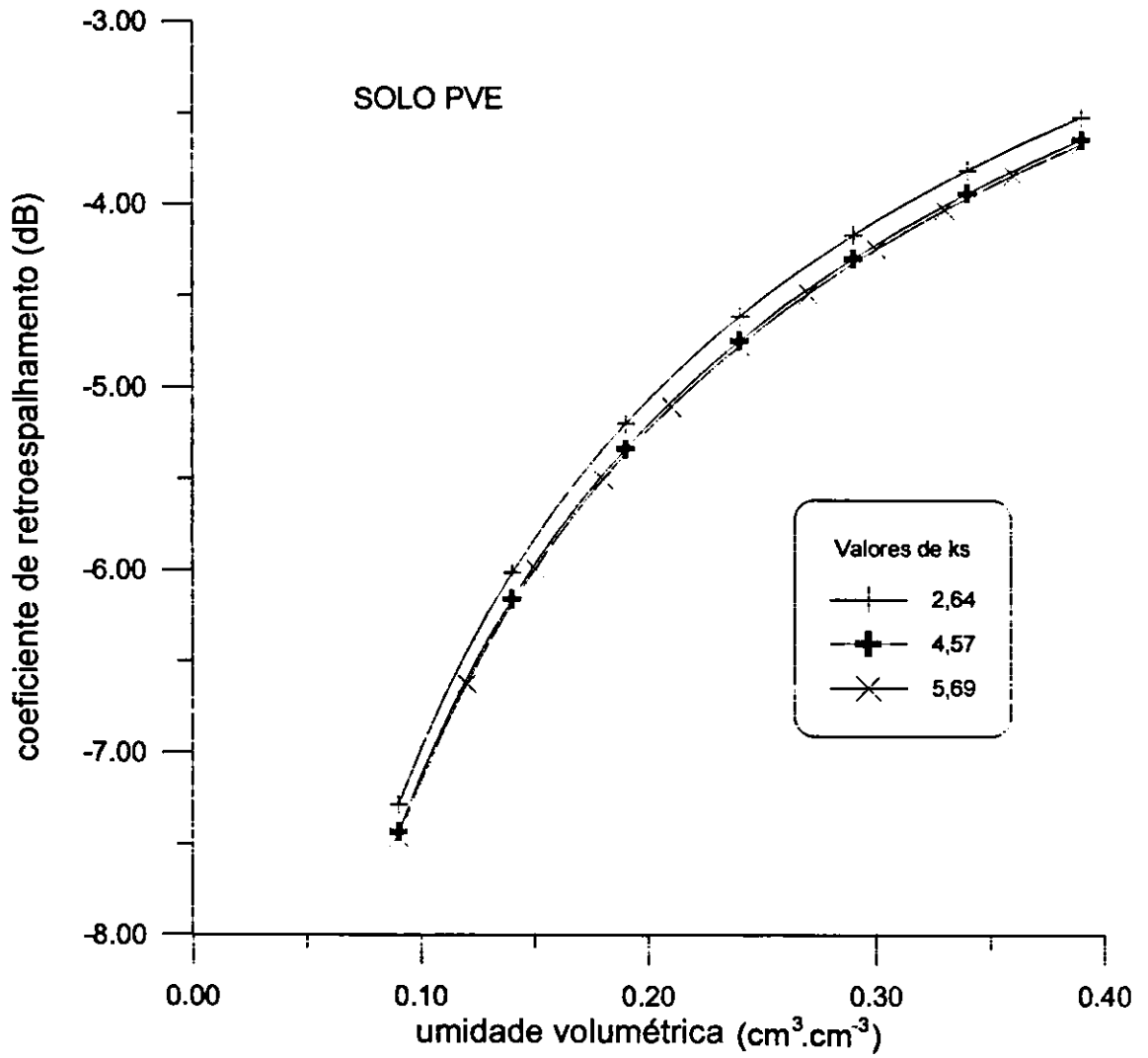


Fig. B.8 - Valores de σ° em função da umidade volumétrica para 3 tipos de rugosidade.

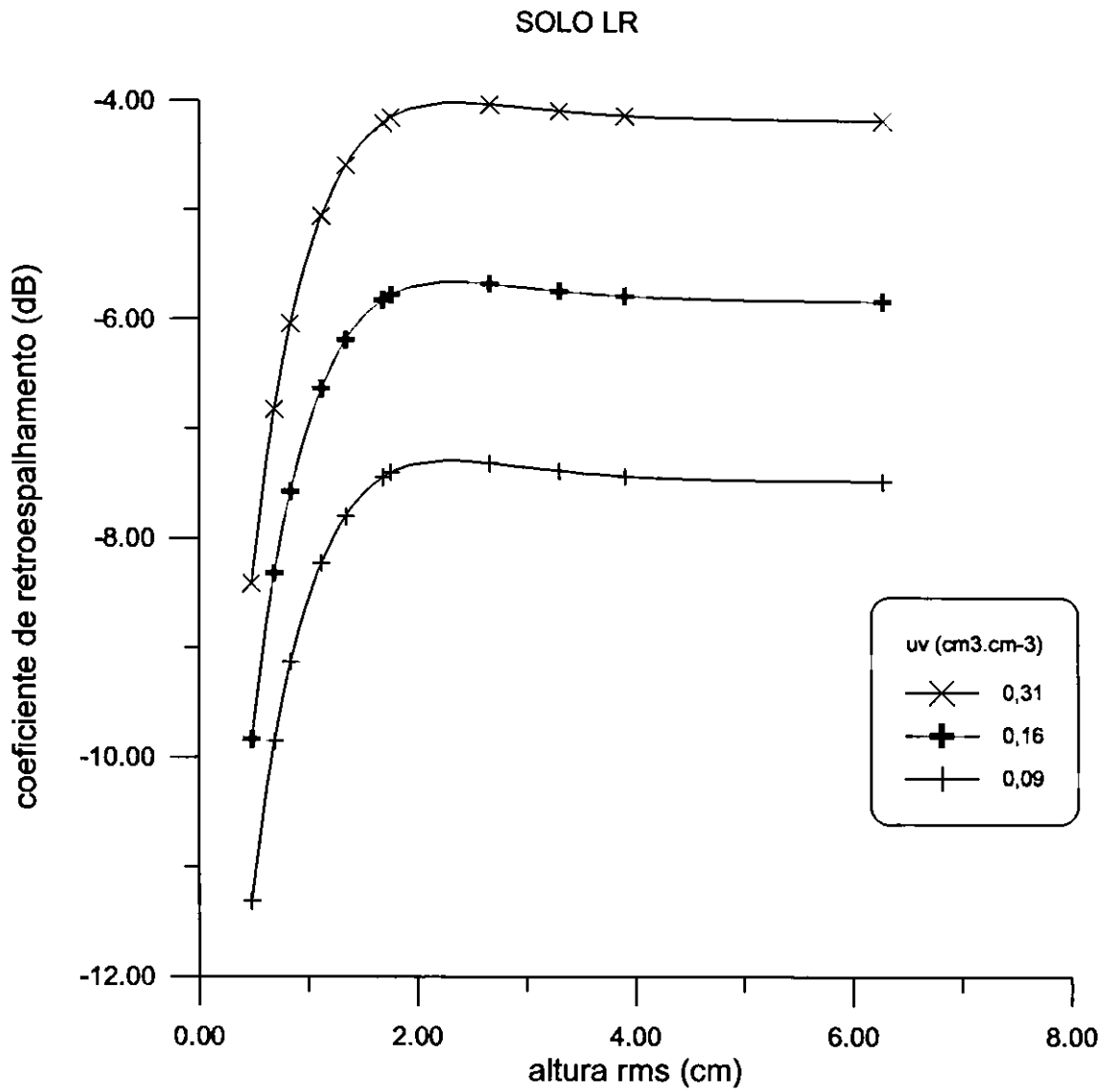


Fig. B.9 - Valores de σ° em função da altura rms para 3 teores de umidade.

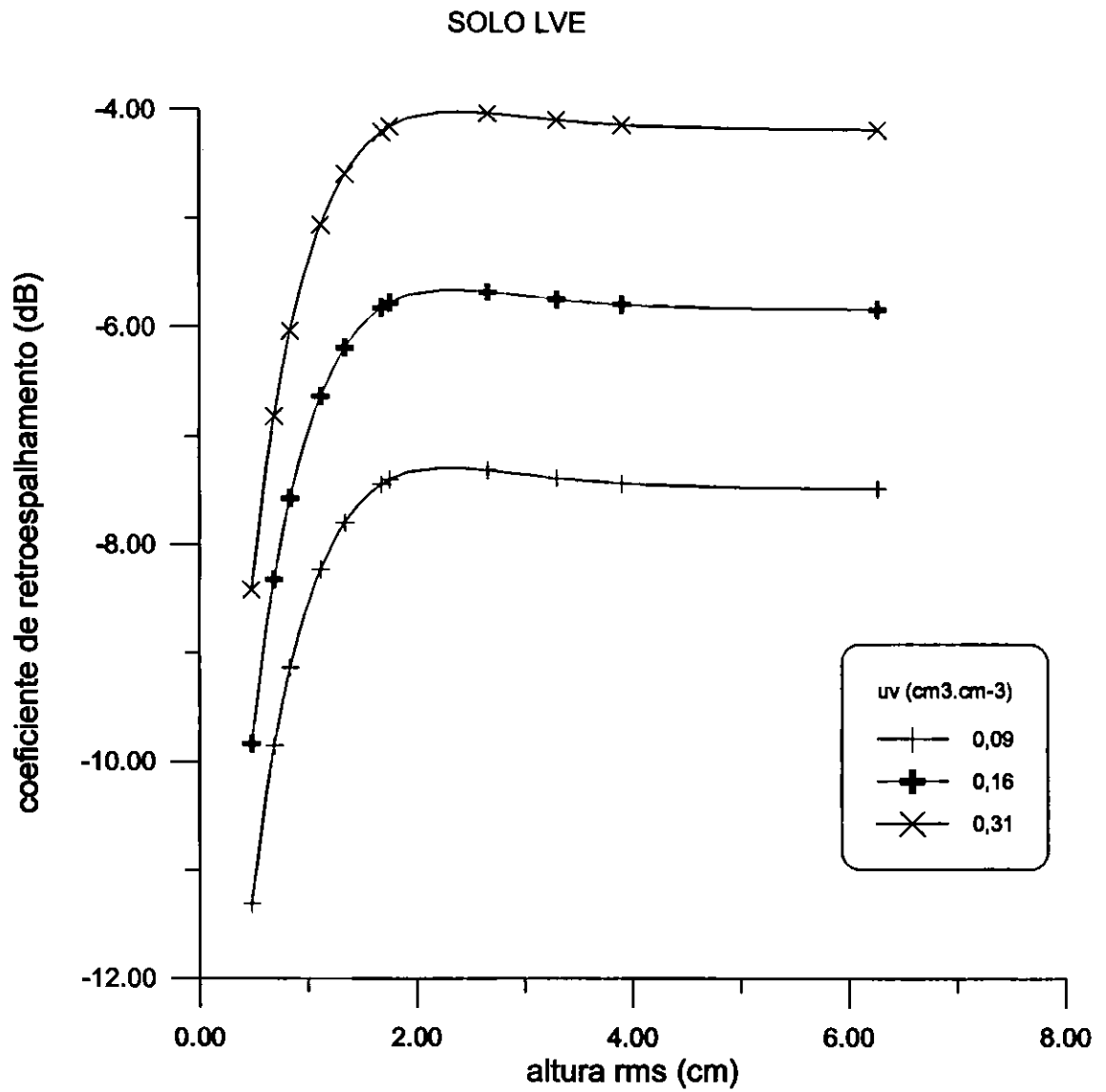


Fig. B.10 - Valores de σ° em função da altura rms para 3 teores de umidade.

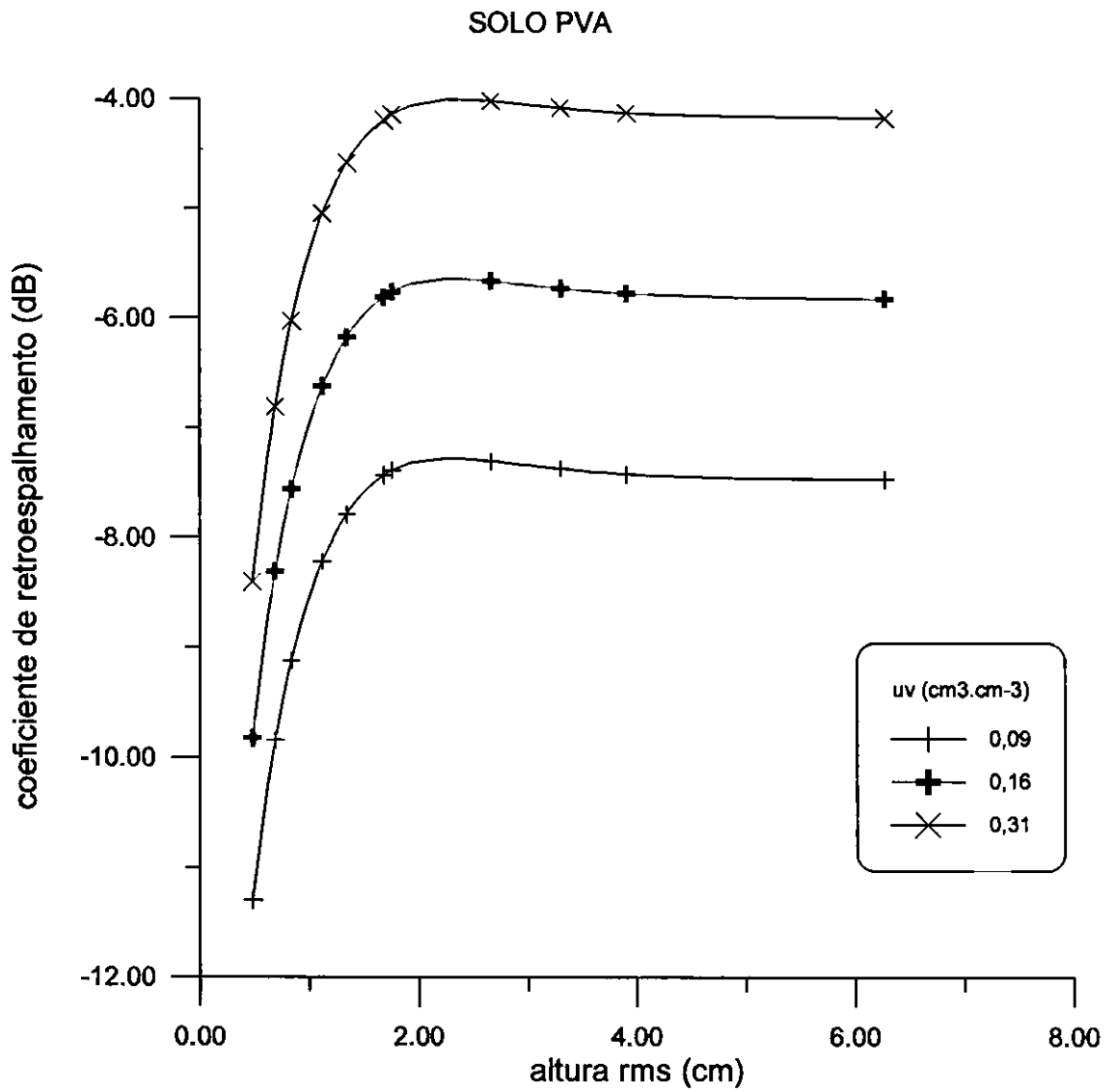


Fig. B.11 - Valores de σ° em função da altura rms para 3 teores de unidade.

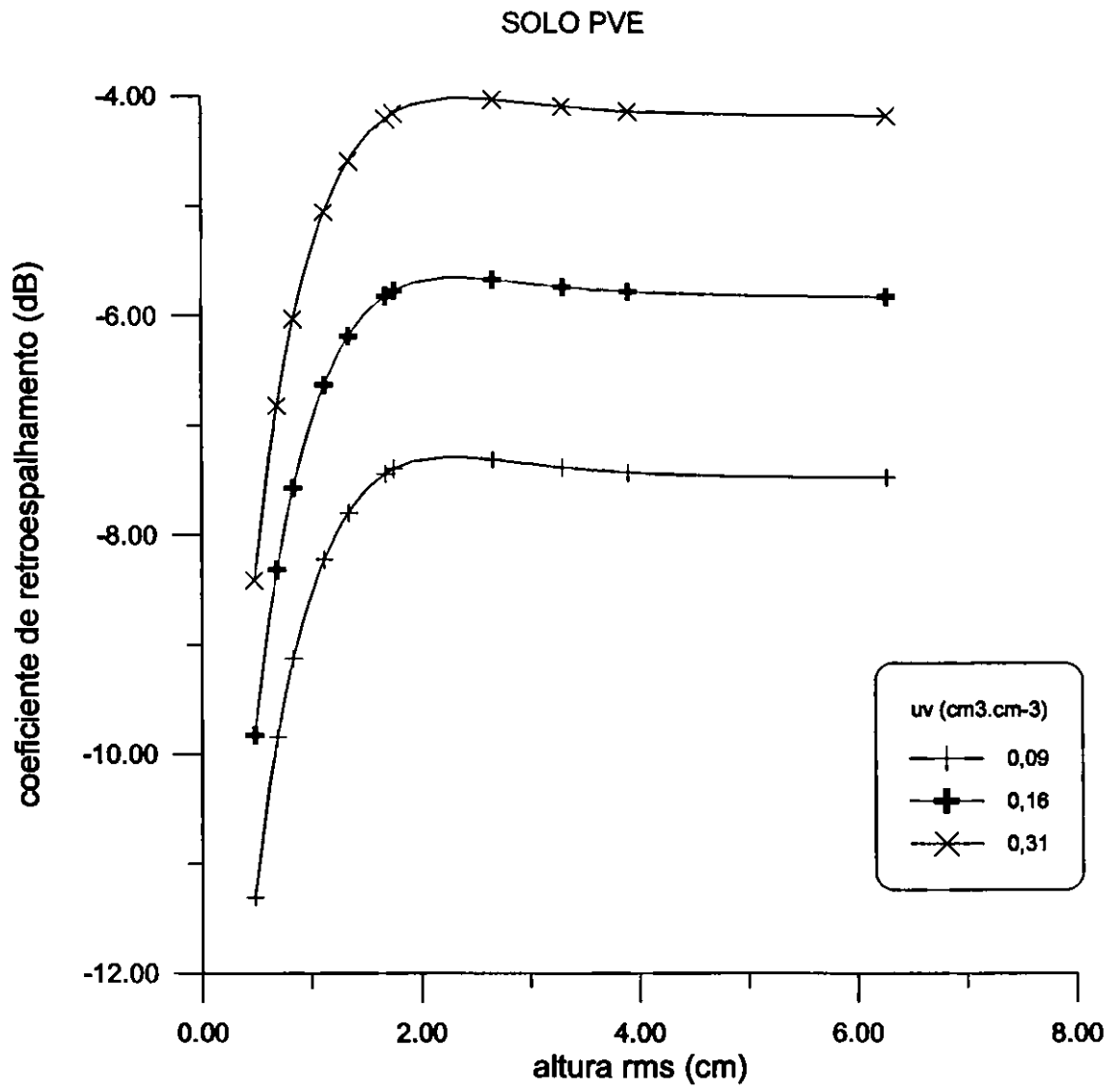


Fig. B.12 - Valores de σ° em função da altura rms para 3 teores de umidade.

APÊNDICE C

LISTAGEM DOS PROGRAMAS UTILIZADOS

Os seguintes programas foram utilizados para a geração dos gráficos apresentados, todos eles feitos no aplicativo Matlab.

As seguintes siglas foram utilizadas:

mir - permeabilidade complexa relativa

s = altura rms

eps1 = parte real da permitividade complexa relativa

eps2 = parte imaginária da permitividade complexa relativa

uv = unidade volumétrica

% programa que gera o valor de σ^o a cada valor de s (altura rms) para valores de unidade volumétrica

% modelo EMPÍRICO

clear;

echo off all;

disp('MODELO EMPÍRICO');

mir=1;

% mir = permeabilidade complexa relativa

% s = altura rms

```
s=[
    .479
    .4894
    .6139
    .6555
    .6714
    .6847
    .7673
    .7702
    .8133
    .8173
    .834
    .9137
    .9627
    1.029
    1.084
    1.117
    1.203
    1.239
    1.26
    1.281
    1.34
    1.388
    1.482
    1.546
    1.593
```

```

1.678
1.691
1.703
1.704
1.754
1.755
1.81
1.928
2.251
2.377
2.662
2.942
3.027
3.1
3.105
3.302
3.466
3.487
3.566
3.616
3.903
4.116
4.832
5.055
5.13
6.272 ];
lambda=5.66; % comprimento de onda da Banda C
geraper;
for j=1:51
cont=1;
ss=s[j];
% uv umidade volumétrica
for uv=0.09:0.01:0.39
eps1=a1+b1*uv+c1*uv^2;
eps2=a2+b2*uv+c2*uv^2;
rn=simevv(mir,eps1,eps2,ss);
X(cont,1)=10*log10(rn);
cont=cont+1;
end;
disp(X);
end;
end

% programa que gera a permitividade complexa
% através do modelo de Hallikainen
A=[ 1.993 -0.123
    0.002 0.002

```

```

0.015 0.003
38.086 7.502
-0.176 -0.0508
-0.633 -0.116
10.720 2.942
1.256 0.452
1.522 0.543 ];
clc;
% are = porcentagem de areia;
% arg = porcentagem de argila;
are=input('porcentagem de areia ');
arg=input('porcentagem de argila ');
are=are/100;
arg=arg/100;
a1=A(1,1)+A(2,1)*are+A(3,1)*arg;
b1=A(4,1)+A(5,1)*are+A(6,1)*arg;
c1=A(7,1)+A(8,1)*are+A(9,1)*arg;
a2=A(1,2)+A(2,2)*are+A(3,2)*arg;
b2=A(4,2)+A(5,2)*are+A(6,2)*arg;
c2=A(7,2)+A(8,2)*are+A(9,2)*arg;

% programa que gera os valores de  $\sigma^o$  para 3 condições de
umidade em função da altura rms
% modelo EMPIRICO
clear;
echo off all;
disp('MODELO EMPIRICO');
mir=1;
% input('valor de mir ');
%input('valor da altura rms ');
s=[ .479
    .4894
    .6139
    .6555
    .6714
    .6847
    .7673
    .7702
    .8133
    .8173
    .834
    .9137
    .9627
    1.029
    1.084
    1.117
    1.203
    1.239
    1.26

```

```

1.281
1.34
1.388
1.482
1.546
1.593
1.678
1.691
1.703
1.704
1.754
1.755
1.81
1.928
2.251
2.377
2.662
2.942
3.027
3.1
3.105
3.302
3.466
3.487
3.566
3.616
3.903
4.116
4.832
5.055
5.13
6.272 ];
lambda=5.66;
geraper;
uv=0.09;
  eps1=a1+b1*uv+c1*uv^2;
  eps2=-a2+b2*uv+c2*uv^2;
for j=1:51
  ss=s(j);
  rn=simevv(mir,eps1,eps2,ss);
  X(j,1)=s(j);
  X(j,2)=10*log10(rn);
end;
uv=0.16;
  eps1=a1+b1*uv+c1*uv^2;
  eps2=-a2+b2*uv+c2*uv^2;
for j=1:51
  ss=s(j);
  rn=simevv(mir,eps1,eps2,ss);
  X(j,3)=10*log10(rn);

```

```

end;
uv=0.31;
  eps1=a1+b1*uv+c1*uv^2;
  eps2=a2+b2*uv+c2*uv^2;
for j=1:51
  ss=s(j);
  rn=simevv(mir,eps1,eps2,ss);
  X(j,4)=10*log10(rn);
end;
diary rulr.dat
disp(X);
end;
diary off;
end

```

```

% sigma zero para o modelo empirico
function y=simevv(mir,eps1,eps2,s);
pi=atan(1)*4;
k=2*pi/5.66;
g=0.7*(1-exp(-0.65*(k*s)^1.8));
i=sqrt(-1);
epsr=eps1 -i*eps2;
gamazero=(abs((1-sqrt(epsr))/(1+sqrt(epsr))))^2;
teta=23*pi/180;
raizp=1-(2*teta/pi)^(gamazero/3)*exp(-k*s);
y=
g*(cos(teta)^3)/raizp*((abs(rper(mir,eps1,eps2)))^2+(abs(rp
ar(mir,eps1,eps2)))^2);

```

```

%coeficiente de reflexao de Fresnel da onda polarizada
%verticalmente
function y=rpar(mir,eps1,eps2);
teta=23*pi/180;
i=sqrt(-1);
epsr=eps1-i*eps2;
y1=epsr*cos(teta)-sqrt(mir*epsr-sin(teta)^2);
y2=epsr*cos(teta)+sqrt(mir*epsr-sin(teta)^2);
y=y1./y2;

```

```

%coeficiente de reflexao de Fresnel da onda polarizada
%verticalmente
function y=rpar(mir,eps1,eps2);
teta=23*pi/180;

```

```
i=sqrt(-1);  
epsr=eps1-i*eps2;  
y1=epsr*cos(teta)-sqrt(mir*epsr-sin(teta)^2);  
y2=epsr*cos(teta)+sqrt(mir*epsr-sin(teta)^2);  
y=y1./y2;
```

```
function y=rper(mir,eps1,eps2);  
%coeficiente de reflexao de Fresnel para onda polarizada  
% horizontalmente  
teta=23*pi/180;  
i=sqrt(-1);  
y1=mir*cos(teta)-sqrt(mir*(eps1-i*eps2)-sin(teta)^2);  
y2=mir*cos(teta)+sqrt(mir*(eps1-i*eps2)-sin(teta)^2);  
y=y1./y2;
```