

NOTA

ESTIMATIVA DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO UTILIZANDO DADOS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA⁽¹⁾

O. A. MÁXIMO⁽²⁾, A. M. SAAD⁽³⁾ & H. H. KUX⁽⁴⁾

RESUMO

Em virtude da crescente demanda mundial por alimentos, um monitoramento eficaz e em larga escala da umidade do solo constitui fator de grande importância para a previsão de safras. Este trabalho teve por objetivo apresentar uma técnica para o cálculo do teor de água no solo, utilizando modelos preditivos de umidade do solo, baseados em dados de radar de abertura sintética (SAR). Foram utilizados dados do SAR a bordo do JERS-1 ("Japanese Earth Resources Satellite") e dois modelos empíricos. O primeiro relaciona o coeficiente de retroespalhamento com a permissividade complexa (modelo de Dubois), e o segundo relaciona a permissividade complexa com o teor de água do solo e algumas de suas características físico-hídricas, tais como percentagem de areia e argila (modelo de Hallikainen). Inicialmente, os dados do SAR/JERS-1 foram calibrados e, por meio do modelo de Dubois, foram calculados os valores de permissividade complexa. Para tanto, foi necessário inserir níveis estimados de rugosidade do solo. A partir destes resultados, utilizou-se o modelo de Hallikainen para calcular a umidade volumétrica. A análise geral dos resultados indica que a técnica de estimação de umidade do solo a partir de imagens de radar de abertura sintética, utilizada neste estudo, mostrou-se física e matematicamente exequível. No entanto, apresentou uma precisão moderada, não sendo ainda recomendada para o uso operacional no mapeamento de umidade do solo. A análise dos resultados revelou também que a precisão dos dados é bastante influenciada pela precisão dos valores de rugosidade introduzidos.

Termos de indexação: umidade do solo, milho, modelos preditivos.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada e aprovada no INPE, São José dos Campos (SP), em 21 de outubro de 1997. Recebido para publicação em julho de 1998 e aprovado em fevereiro de 1999.

⁽²⁾ Pesquisador da Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial. Rodovia dos Tamoios, Km 5,5, CEP 12228-840 São José dos Campos (SP). E-mail: maximo@ieav.cta.br.

⁽³⁾ Pesquisador colaborador do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo, em pós-doutoramento no Departamento de Engenharia Rural - DER da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ-USP. Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 09, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Email: amsaad@carpa.ciagri.usp.br.

⁽⁴⁾ Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515, CEP 12.227-010 São José dos Campos (SP). E-mail: hermann@ltid.inpe.br.

SUMMARY: SOIL MOISTURE RETRIEVAL USING SAR DATA

This paper describes a technique that retrieves soil moisture from monopolarized SAR data. The technique uses SAR data obtained by the Japanese Earth Resources Satellite (JERS-1) and two empirical models. One relates the backscatter coefficient with the complex permittivity (Dubois's model), and the other relates the complex permittivity with soil parameters such as soil moisture (Hallikainen's model). First, the SAR data were calibrated to obtain the backscatter coefficient and the Dubois's model was inverted to achieve the complex permittivity. The insertion of estimated values of roughness was necessary to use the inverted equation with JERS-1 SAR data. Using these results and the Hallikainen's model, the soil moisture was calculated and compared with field measurements. The results were found to be moderately accurate and the inverted models were quite sensitive to the precision of the estimated values of roughness.

Index terms: synthetic aperture radar, water content, corn, retrieval models.

INTRODUÇÃO

No Brasil, as grandes extensões de áreas irrigadas (400.000 ha) estão localizadas no Centro-Oeste e no Sudeste, em regiões de cerrado. Essa área está sendo irrigada por meio do sistema de aspersão mecanizado, cujo equipamento de maior expressão é o pivô central. O consumo anual de água estimado nessa área é de $1,12 \times 10^9 \text{ m}^3$. Na totalidade, não existe nenhum sistema de controle da quantidade de água a ser aplicada, tampouco definido o momento ideal para se iniciar a irrigação. Esse fato faz com que a eficiência do uso do recurso hídrico de superfície seja muito inferior à de áreas semelhantes em países onde essa tecnologia é muito difundida, por exemplo, no estado de Nebraska, nos Estados Unidos da América. A busca de uma solução para minimizar o problema do controle da água de irrigação em grande escala constitui grande desafio tecnológico na área de geoprocessamento. Assim sendo, a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, embora ainda não completamente operacionais, tem possibilitado grandes avanços no campo da agricultura irrigada, pois fornece meios para obter informações numa escala ampla, possibilitando uma análise mais global do problema.

Empregando as técnicas de sensoriamento remoto, as faixas do espectro eletromagnético geralmente utilizadas na estimativa de umidade do solo são as do visível, infravermelho termal e microondas (Idso et al., 1975). Dentre estas, a faixa das microondas vem sendo cada vez mais explorada pelas suas características particulares, tais como a capacidade de penetrar nuvens e chuva e sua independência da luz solar (Idso et al., 1975). Além disso, segundo Schmugge (1983), a quantidade de água no solo influi diretamente no padrão de respostas do solo, quando imageado por sensores que operam na faixa de microondas. Essa influência está

baseada no fato de que a constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, enquanto a do solo seco fica entre 3 e 5.

Nos últimos anos, diversos trabalhos vêm sendo desenvolvidos para modelar a influência da umidade nas propriedades termais e dielétricas do solo, bem como para monitorar a quantidade de água no solo por meio do sensoriamento remoto por microondas. Exemplos destes trabalhos são os de Ulaby et al. (1978, 1979); Chang et al. (1980); Wang & Schmugge (1980); Dobson & Ulaby (1981); Dobson et al. (1985).

Dentro desse contexto, este trabalho teve por objetivo apresentar uma técnica para o cálculo do teor de água no solo, utilizando modelos preditivos de umidade do solo, baseados em dados de radar de abertura sintética.

Teoria

Segundo Ulaby et al. (1981), todo dispositivo que opera na faixa de microondas (radiação com frequência entre 0,3 e 300 GHz), no qual um transmissor ilumina uma superfície e um receptor capta e mede algumas propriedades do sinal que retorna ao sensor proveniente dessa superfície, pode ser denominado RADAR (Radio Detection and Ranging).

Um radar imageador é um dispositivo que gera uma imagem a partir dos sinais refletidos pela superfície iluminada. Tais sinais são chamados de ecos de radar.

Nesses radares, que, em geral, têm a geometria de imageamento ilustrada na figura 1, a imagem é produzida por meio do movimento da plataforma onde o radar está instalado sobre a área de interesse. Um pulso curto é transmitido pelo radar, propagando-se da linha de visada mais próxima até a mais distante, numa seqüência de transmissões e recepções de pulsos (Damião, 1994).

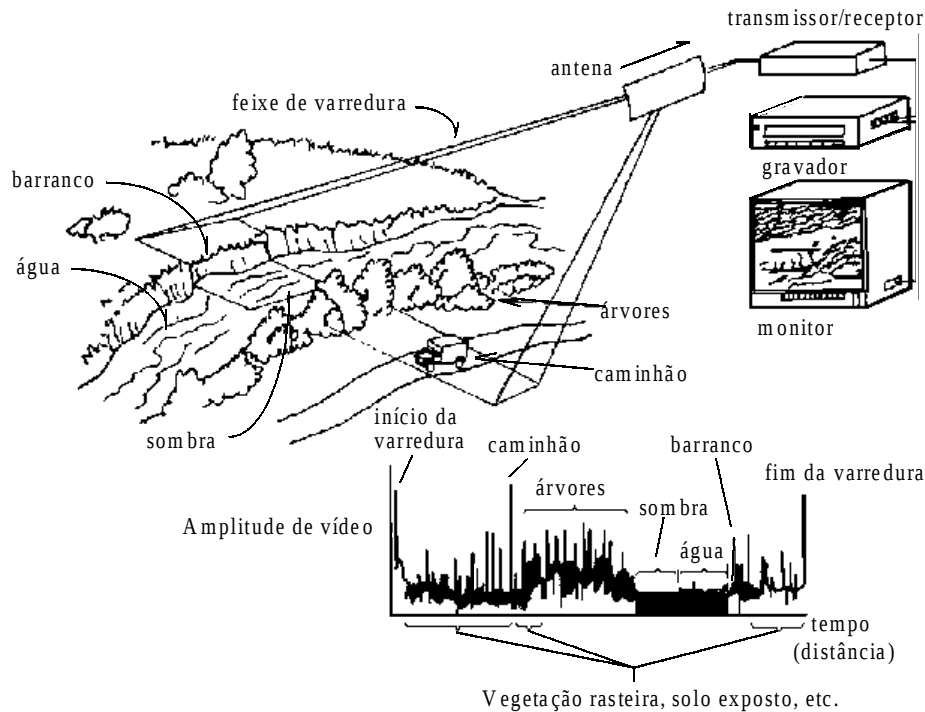


Figura 1. Geometria de aquisição de imagens de radar.

Quando o pulso incide sobre o alvo, parte do sinal retorna ao radar. O eco devido a cada pulso transmitido é amostrado, digitalizado e gravado em memória, fita ou outro meio físico de armazenamento de dados. A seqüência dos pulsos é ajustada para estar em sincronismo com o movimento da plataforma. Assim, quando esta se mover o equivalente a uma largura de feixe, o sinal de retorno será proveniente de uma faixa do solo diferente e adjacente. A seqüência de sinais formada com o deslocamento da plataforma gera a imagem do radar (Ulaby et al., 1982).

Pode-se perceber que a distinção entre diferentes objetos sensoriados é causada principalmente pela diferença na potência do sinal recebido pelo radar. Desse modo, a medição precisa da potência desse sinal é de grande importância. A relação fundamental entre as características do alvo, do radar e do sinal recebido é expressa por meio da "Equação do Radar" (Ulaby et al., 1982).

Segundo Skolnik (1962), uma das formas clássicas de se apresentar esta equação é:

$$P_r = \frac{P_t A_e^2}{4\pi\lambda^2 R^4} \cdot \sigma \quad (1)$$

em que

P_r é a potência que retorna ao radar em W,

P_t é a potência de transmissão em W,

A_e é a área efetiva de recepção da antena em m^2 ,

λ é o comprimento de onda da radiação usada em m, R é a distância sensor-superfície em m e σ é o coeficiente de retroespalhamento do alvo em m^2 .

Uma vez escolhido o sensor, todos os parâmetros desta equação, com exceção do coeficiente de retroespalhamento, tendem a permanecer constantes, de modo que as variações na potência de retorno devem-se, primordialmente, a variações nos valores do coeficiente de retroespalhamento.

Assim, se o coeficiente de retroespalhamento de um alvo puder ser modelado em função de algumas de suas características (rugosidade, constituição química e umidade, por exemplo), pode-se estabelecer uma relação entre os dados do radar e estas características do alvo.

Para modelar o coeficiente de retroespalhamento a partir de parâmetros da área iluminada, duas abordagens têm sido utilizadas: uma abordagem teórica e outra empírica. A abordagem teórica é composta por equações que, muito embora sejam úteis para explicar diversos fenômenos, têm, na maioria das vezes, uma região de validade muito restrita, incluem variáveis difíceis de ser encontradas e de difícil implementação computacional. Ulaby et al. (1982, 1986) apresentaram uma descrição das formulações de Kirchhoff, que descrevem teoricamente o espalhamento de superfícies segundo uma aproximação escalar (Modelo de Óptica Física) e uma aproximação de fase estacionária (Modelo de Óptica Geométrica).

Para contornar as restrições impostas pelos modelos teóricos, utiliza-se a abordagem empírica, que modela o coeficiente de retroespalhamento em função de poucos e simples parâmetros, tais como a rugosidade, o teor de água e o ângulo de incidência. Diversos trabalhos vêm sendo realizados com esse objetivo, dos quais se destacam os de Oh et al. (1992, 1994), Ulaby & Siquiera (1995) e Dubois et al. (1995).

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo escolhida foi um pivô central, localizado na Fazenda Cachoeirinha, município de Guaíra (20°27'30"S, 48°19'30"W, 495 m) no estado de São Paulo.

Este pivô apresenta 570 m de raio e, na época do estudo (setembro de 1995), estava subdividido em quatro quadrantes, nos quais havia plantações de milho, com 5, 20 e 135 dias de germinação, e soja, com 30 dias de germinação. Foram escolhidas as áreas de milho com cinco dias após a emergência, para representar solo exposto, e a área de milho com 20 dias, para avaliar a influência da cobertura vegetal na precisão dos resultados. Os quadrantes restantes foram desconsiderados por impedirem a medição da rugosidade, considerando a estrutura do dossel.

A unidade pedológica encontrada nessa região é o Latossolo Roxo. O quadro 1 apresenta os valores médios para um perfil de 0-0,5 m de alguns parâmetros físicos desse solo da fazenda Cachoeirinha, fornecidos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

A coleta de dados foi efetuada de forma radial, como mostra a figura 2. Em cada ponto, foram coletadas amostras de rugosidade e de umidade. Foram realizadas, ao todo, 34 medidas na área de interesse. Desse total, 24 leituras foram feitas na área de milho com cinco dias de emergência e as restantes (10 leituras) na área de milho com 20 dias de emergência.

Para determinar a rugosidade, foi utilizado um rugosímetro de varetas, desenvolvido na Universidade de Wageningen (Holanda) e construído nas oficinas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para determinar a umidade, as amostras foram colhidas na camada de 0-0,05 m e foi utilizado o método de estufa (105 a 115°C).

O trabalho de campo foi realizado no mesmo horário em que a região estava sendo imageada pelo "Japanese Earth Resources Satellite" (JERS-1). O quadro 2 apresenta as principais características desse satélite.

Segundo Nemoto et al. (1991), o radar de abertura sintética a bordo do JERS-1 opera na frequência de

Quadro 1. Características físicas do Latossolo Roxo A moderado textura muito argilosa, Fazenda Cachoeirinha, Guaíra, SP. Valores médios para perfil de 0-0,5 m

Granulometria (g kg ⁻¹)							Densidade (kg dm ⁻³)		Porosidade (m ³ m ⁻³)	
Areia					Silte	Argila				
MG	G	M	F	MF			Solo	Partícula	Calculada	Determinada
0,3	1,5	7,8	10,3	5,0	18,8	56,5	1,22	3,04	62,5	57,5

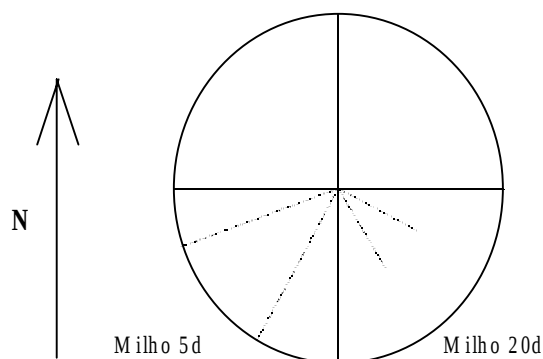


Figura 2. Desenho esquemático da coleta de dados.

Quadro 2. Características técnicas do JERS-1

Órbita	Sol-síncrona
Altitude	568 Km
Período	96 min
Período de recorrência	44 dias
Horário de passagem asc.	10:30 até 11:00 horário local
Equipamentos da missão	- Radar de Abertura Sintética - Sensor óptico - Gravador de dados - Transmissor de dados
Veículo lançador	Foguete H-1

Fonte: NASDA (1994).

1.275 MHz, polarização horizontal para envio e recepção e gera imagens com uma resolução espacial de 18 metros.

A figura 3 apresenta a imagem utilizada no trabalho com o pivô em destaque.

O organograma esquemático para calcular a umidade do solo a partir de uma imagem de radar encontra-se na figura 4.

Para esse cálculo, dividiu-se o trabalho em duas etapas. Na primeira, foi feito o trabalho de campo ao mesmo tempo em que a área era imageada pelo radar a bordo do JERS-1. A partir da imagem obtida pelo sensor, foi realizada a extração do valor digital dos pixels da área selecionada e, posteriormente, a conversão desses valores para valores de coeficiente de retroespalhamento (σ^0).

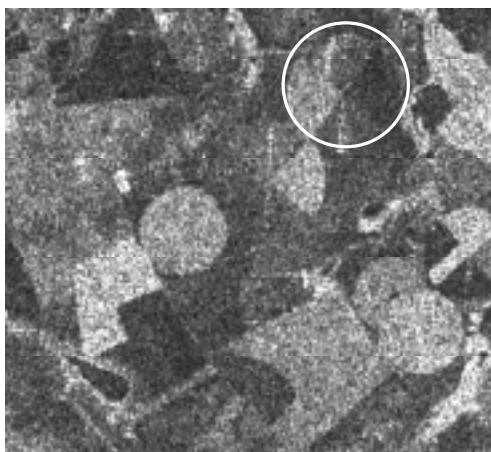


Figura 3. Área-teste com pivô em destaque.

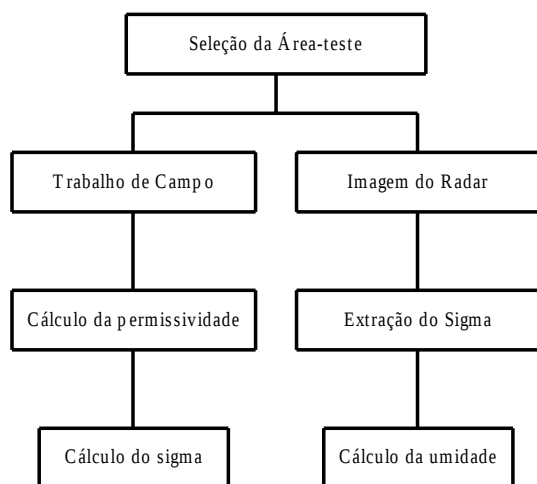


Figura 4. Organograma esquemático do desenvolvimento do cálculo da umidade do solo a partir de uma imagem de radar.

Para essa conversão, foi utilizada a relação proposta por Shimada (1996):

$$\sigma^0(\text{dB}) = \text{CF}(\text{dB}) + 10 \log \left(\frac{\sum \text{VA}^2}{N} \right) \quad (2)$$

em que

σ^0 é o coeficiente de retroespalhamento em dB,

CF é um fator de calibração em dB,

VA é o valor do pixel e

N é o número de pixels.

Em seguida, os dados coletados em campo foram utilizados como parâmetros de entrada do modelo de Dubois para polarização horizontal (Equação 3), e os resultados desse cálculo foram comparados com os obtidos da imagem.

As equações do modelo de Dubois, apresentadas em Dubois et al. (1995), são:

$$\sigma_{\text{hh}}^0 = 10^{-2,75 \frac{\cos^{15} \phi}{\sin^5 \phi}} 10^{0,028 \epsilon \tan \phi (k \sin \phi)^{14} \lambda^{0,7}} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{vv}}^0 = 10^{-2,35 \frac{\cos^3 \phi}{\sin^3 \phi}} 10^{0,046 \epsilon \tan \phi (k \sin \phi)^{11} \lambda^{0,7}} \quad (4)$$

em que

ϕ é o ângulo de incidência em graus,

k é o número de onda,

s é o desvio-padrão de altura (altura rms),

ϵ é a permissividade complexa e

λ é o comprimento de onda em m.

Na segunda etapa, os dados calculados a partir da imagem foram utilizados como parâmetros de entrada para a equação 3 e esta foi resolvida para se obterem os valores de permissividade complexa. Em seguida, esses valores de permissividade foram usados como parâmetros de entrada do modelo de Hallikainen, calculando-se a umidade do solo.

O modelo utilizado nesse estudo, apresentado em Hallikainen et al. (1985), corresponde a:

$$\epsilon = (a_0 + a_1 S + a_2 C) + (b_0 + b_1 S + b_2 C) \theta + (c_0 + c_1 S + c_2 C) \theta^2 \quad (5)$$

em que

ϵ é a permissividade complexa,

a, b e c são coeficientes empíricos conhecidos,

S é a percentagem de areia do solo,

C é a percentagem de argila do solo e

θ é umidade volumétrica do solo em %.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O quadro 3 apresenta um resumo dos dados de umidade volumétrica e rugosidade coletados durante o trabalho de campo.

Quadro 3. Resumo estatístico dos dados coletados em campo, na profundidade de 0-0,05 m

Milho – 5 dias								Milho – 20 dias							
Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$)				Rugosidade (rms) ⁽¹⁾				Umidade volumétrica ($m^3 m^{-3}$)				Rugosidade (rms)			
Mínima	Máxima	Média	DP	Mínima	Máxima	Média	DP	Mínima	Máxima	Média	DP	Mínima	Máxima	Média	DP
26,6	32,1	28,6	1,1	0,82	2,67	1,36	0,47	29,4	30,5	30,0	0,37	1,27	2,14	1,61	0,26

⁽¹⁾ rms representa o desvio-padrão da variação da rugosidade da superfície.

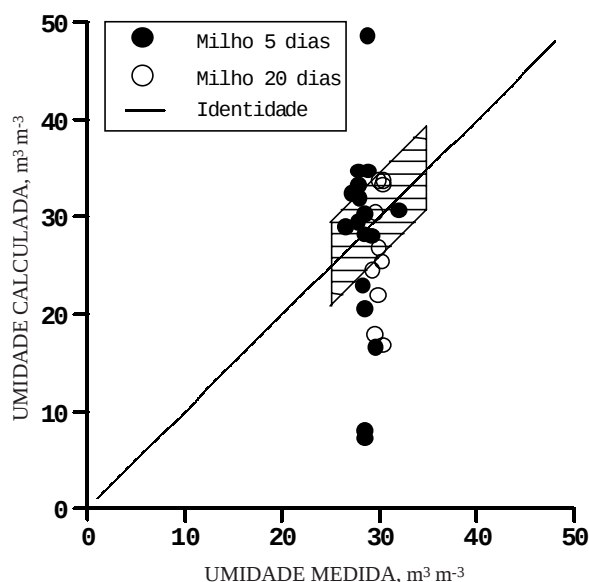
Os baixos valores de desvio-padrão (DP) indicam uma tendência de uniformidade tanto na área de milho com cinco dias de germinação quanto na área de milho com 20 dias. Essa uniformidade já era esperada por causa da agricultura irrigada desenvolvida na região (pivô central).

Esses dados, juntamente com os apresentados no quadro 1, foram utilizados no cálculo da umidade volumétrica, conforme descrito na seção anterior.

A comparação entre os valores de umidade calculados e coletados em campo é apresentada na figura 5.

Quanto à presença da vegetação, nota-se uma tendência de subestimação dos valores de umidade para a área de milho com 20 dias. Essa tendência também foi observada em Dubois et al. (1995).

A região em destaque no gráfico da figura 5 corresponde aos valores que mostram um erro máximo de 4% em relação aos valores medidos. Esse erro é compatível com os erros médios obtidos por Oh et al. (1992) - 4% - e Dubois et al. (1995) - 4,5%.

**Figura 5. Comparação entre os valores de umidade calculados e medidos em campo.**

Neste estudo, o erro médio para a região de milho com cinco dias foi de 7,26% e o desvio-padrão de 7,09. Para a região de milho com 20 dias, o erro médio foi de 5,73% e o desvio-padrão de 4,17.

Esses valores foram influenciados principalmente por dois fatores. O primeiro deve-se ao uso de apenas uma imagem, enquanto os modelos de Oh et al. (1992), Dubois et al. (1995) e Ulaby & Siqueira (1995), por exemplo, utilizaram duas ou mais imagens com polarizações cruzadas (HH, VV, HV, VH).

Soares & Rennó (1996) verificaram uma queda de correlação nos resultados, quando, utilizando apenas uma imagem, obtiveram valores compatíveis com os deste estudo.

Além disso, a inserção dos valores de rugosidade também serviu como fonte de erros no processo de determinação da umidade por meio de imagens de radar de abertura sintética. Tal influência também foi observada em Soares & Rennó (1996).

Para que se pudesse obter uma estimativa dessa influência, foram calculados os valores de rugosidade que garantiriam um acerto de 100% na estimativa da umidade, e, em seguida, introduzidos erros nesses valores, comparando os resultados com eles e com os originais. Um resumo dos cálculos para área de milho com cinco dias é apresentado na figura 6, onde se observa grande perda de correlação com a inserção de erros.

A análise geral dos resultados indica que a técnica de estimação de umidade do solo a partir de imagens de radar de abertura sintética, utilizada neste estudo, mostrou-se física e matematicamente exeqüível. No entanto, apresentou uma precisão moderada, não sendo ainda recomendada para o uso operacional no mapeamento de umidade do solo.

Além disso, a coleta de dados foi realizada na camada de 0-0,05 m, o que limita as conclusões para esta faixa de profundidade. É necessário que sejam realizados novos experimentos em outras profundidades para estender as conclusões para culturas que tenham uma profundidade de raízes maior.

Por fim, cabe ressaltar que a técnica apresentada neste estudo poderá ser aprimorada a partir de um delineamento experimental que cubra uma faixa de

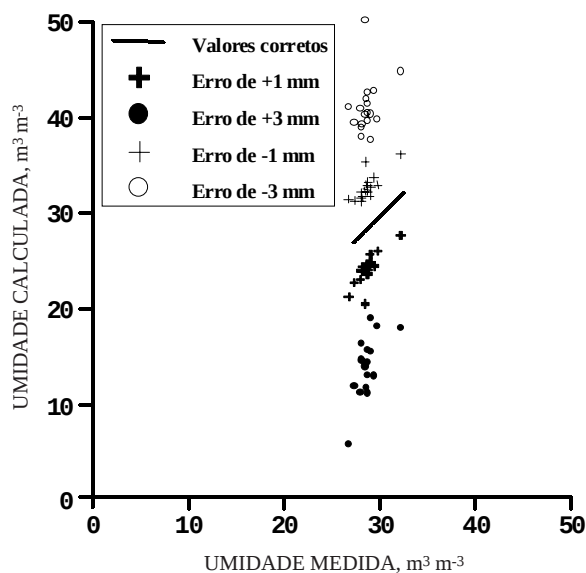


Figura 6. Influência dos erros de altura rms na correlação dos valores calculados e medidos de umidade volumétrica.

umidade mais ampla (Quadro 3), da utilização de pares de imagens com polarizações cruzadas e do desenvolvimento de novas técnicas para a estimativa/medição da rugosidade superficial.

CONCLUSÕES

1. Segundo resultados deste trabalho, a estimativa da umidade do solo utilizando imagens de radar mostrou-se física e matematicamente exequível.

2. A utilização de imagens monopolarizadas exigiu a inserção de valores estimados ou medidos de rugosidade.

3. Nesse caso, a precisão da estimativa de umidade foi considerada moderada.

4. A precisão dos dados de rugosidade introduzidos revelou forte influência na correlação dos resultados.

5. Esta técnica ainda não pode ser recomendada para um mapeamento operacional da umidade do solo ou como método de controle de manejo de irrigação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais e do Centro Técnico Aeroespacial.

LITERATURA CITADA

- CHANG, A.T.C.; ATWATER, S.G.; SALOMONSON, V.V.; ESTES, J.S.; SIMONETT, D.S. & BRYAN, M.L. L-Band radar sensing of soil moisture. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-18:303-310, 1980.
- DAMIÃO, D.P. Análise comparativa de imagens multisensores (TM/Landsat e SAR/ERS-1) e multitemporais, na região de Guaíra, SP. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1994. 107p. (Tese de Mestrado)
- DOBSON, M.C. & ULABY, F.T. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and texture: Part III - soil tension. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-19:51-61, 1981.
- DOBSON, M.C.; ULABY, F.T.; HALLIKAINEN, M.T. & EL-RAYES, M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II: dielectric mixing models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23:35-46, 1985.
- DUBOIS, P.C.; ZYL, J. & ENGMAN, T. Measuring soil moisture with imaging radars. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 33:915-926, 1995.
- HALLIKAINEN, M.T.; ULABY, F.T.; DOBSON, M.C. & EL-RAYES, M.A. Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I: Empirical models and experimental observations. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-23:25-34, 1985.
- IDSO, S.B.; JACKSON, R.D. & REGINATO, R.J. Detection of soil moisture by remote surveillance. *Am. Sci.*, 63:549-557, 1975.
- NASDA - Earth Observation Center. JERS-1 Data users handbook. 296p. 1994.
- NEMOTO, Y.; NISHINO, H.; ONO, M.; MIZUTAMARI, H.; NISHIKAWA, K. & TANAKA, K. Japanese earth resources satellite - 1 - Synthetic Aperture Radar. *Proc. IEEE*, 79:800-809, 1991.
- OH, Y.; SARABANDI, K. & ULABY, F.T. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from soil surfaces. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-30:370-381, 1992.
- OH, Y.; SARABANDI, K. & ULABY, F.T. An inversion algorithm for retrieving soil moisture and surface roughness from polarimetric radar observation. In: *INTERNATIONAL GEOSCI. REMOTE SENS. SYMPOSIUM, 1994, Pasadena, CA, Proceedings. IEEE Geoscience and Remote Sensing Society (GRSS), 1994. CD-ROM.*
- SCHMUGGE, T.J. Remote sensing of soil moisture: recent advances. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, GE-21:336-344, 1983.
- SHIMADA, M. Radiometric and geometric calibration of JERS-1 SAR. *Adv. Space Res.*, 17:79-88, 1996.
- SKOLNIK, M.L. Introduction to radar systems. 2.ed. New York, McGraw-Hill, 1962. 648p.
- SOARES, J.V. & RENNÓ, C.D. Soil moisture retrieval from active microwave remote sensing. In: *LATINO-AMERICAN SEMINAR ON RADAR REMOTE SENSING, 1., 1996, Buenos Aires, Proceedings. Buenos Aires, 1996. p.195-203.*
- ULABY, F.T.; BATLIVALA, P.P. & DOBSON, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and texture: Part I - bare soil. *IEEE Trans. Geosci. Elec.*, GE-16:286-295, 1978.

- ULABY, F.T.; BRADLEY, G.A. & DOBSON, M.C. Microwave backscatter dependence on surface roughness, soil moisture, and texture: Part II - vegetation covered soil. IEEE Trans. Geosci. Elec., GE-17:33-40, 1979.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K. & FUNG, A.K. Microwave remote sensing - Active and passive. Washington, D.C., Artech House, v.1. 456p. 1981.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K. & FUNG, A.K. Microwave remote sensing- Active and passive. Washington, D.C., Artech House, v.2. 1064p. 1982.
- ULABY, F.T.; MOORE, R.K. & FUNG, A.K. Microwave remote sensing- Active and passive. Washington, D.C., Artech House, v.3. 1097p. 1986.
- ULABY, F.T. & SIQUEIRA P. Polarimetric SAR soil moisture inversion algorithms. East Lansing, University of Michigan, 1995. (Technical Memorandum)
- WANG, J.R. & SCHMUGGE, T.J. An empirical model for the complex dielectric ermitivity of soils as a function of water content. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., GE-18:288-295, 1980.