

Impacto das Características da Superfície Terrestre no Algoritmo de Inferência da Umidade do Solo no Brasil, Utilizando Observações do Sensor AMSR-E/Aqua

Luciana Rossato¹, Carlos Frederico de Angelis², Regina Célia dos Santos Alvalá²

luciana.rossato@cptec.inpe.br; carlos.angelis@cemaden.gov.br, regina.alvala@cemaden.gov.br

Recebido: 29/08/12 - revisado: 07/11/12 - aceito: 03/07/13

RESUMO

Estudos utilizando o algoritmo LPRM (Land Parameter Retrieval Model) para estimar a umidade superficial do solo sobre todo o continente sul-americano devem ser realizados para melhor controlar os padrões sazonais de umidade do solo em diferentes regiões da América do Sul, uma vez que o modelo foi desenvolvido para condições específicas da América do Norte. Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi aprimorar o algoritmo LPRM e os resultados de Rossato et al. (2011), considerando as características da superfície terrestre do Brasil e utilizando dados de temperatura de superfície medidos in situ e estimadas por satélite (na frequência de 37 GHz). Para determinar a constante dielétrica do solo, a qual é função da umidade do solo, utilizaram-se dados das propriedades físicas do solo extraídas do Levantamento e Reconhecimento de Solos do Brasil. Análises estatísticas, tais como coeficiente de correlação, bias e erro médio quadrático (REMQ), foram utilizadas para a validação da temperatura de superfície e da umidade do solo derivada pela nova versão do algoritmo ajustado para as condições de superfície do território brasileiro (LPRM/BR), obtidas a partir das informações do sensor AMSR-E/Aqua (6,9 GHz - banda C). Os resultados indicaram uma melhoria significativa do LPRM/BR para os sítios experimentais BA-06 e BA-10 do SMEX03, cujas correlações foram iguais a 0,94 e 0,84, respectivamente. Com relação aos resultados de BIAS e REMQ, para a versão original do LPRM, o bias foi de até 0,23 para o sítio BA-06. Porém, para o LPRM/BR observou-se diferenças significativas, apresentando um valor de 0,01 de bias para o sítio BA-06 e REMQ igual a 0 para o sítio BA-11. Devido à ausência de dados de umidade do solo medidos “in situ”, dados de reanálise da umidade do solo (oriundos do modelo Eta) e de precipitação também foram utilizados na avaliação do LPRM/BR. Desse modo, a subestimativa da temperatura de superfície e a superestimativa da umidade do solo apresentada pelo LPRM foi solucionada com o LPRM/BR. Além disso, também se observou um aumento das áreas com altas correlações ($r > 0,8$) obtidos entre o LPRM/BR e as diferentes bases de dados (modelo Eta e precipitação observada do CPTEC/INPE). Logo, concluiu-se que o LPRM/BR permite estimar a umidade do solo a partir das observações em micro-ondas do sensor AMSR-E (banda C) com melhor acurácia em relação à versão original do algoritmo.

Palavras-Chave: LPRM; umidade do solo.

INTRODUÇÃO

A umidade superficial do solo é uma importante variável nos processos hidrológicos, biológicos e biogeoquímicos, os quais são responsáveis pelas trocas de água e de energia na interface solo-atmosfera. Além disso, simulações com modelos numéricos de previsão de tempo têm mostrado que melhores caracterizações da umidade, da vegetação e da temperatura da superfície do solo podem levar a melhorias significativas nas previsões (ZHANG;

FREDERIKSEN, 2003; DOUVILLE, 2004; DRUSCH, 2007; KUKKONEN et al., 2012).

Assim, dada a importância da umidade do solo, diversos métodos foram propostos para a sua determinação como, por exemplo, o gravimétrico, considerado o método direto padrão. Além deste, existem outros métodos indiretos que estimam a umidade do solo a partir de outras propriedades do solo, como o espalhamento de nêutrons, a resistência elétrica e a reflectometria no domínio temporal (TDR) (SCHMUGGE et al., 1980). No entanto, a determinação da umidade do solo “in situ” utilizando tais métodos demanda tempo e trabalho, o que torna inviável a sua utilização em extensas áreas, como, por exemplo, para o Brasil. Assim sendo, a não disponibilidade de dados pontuais de umidade

¹ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/INPE

² Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais/CEMADEN

do solo para o território brasileiro, com o nível de precisão e a extensão geográfica necessária para estudos em escala regional, limita o entendimento da interação entre a umidade do solo e a atmosfera.

Por essa razão, diferentes técnicas de sensoriamento remoto têm sido utilizadas para caracterizar a variabilidade espacial e temporal da umidade do solo sobre extensas áreas, uma vez que o sensoriamento remoto tem a vantagem de fornecer informações integradas espacialmente e repetidas observações sobre intervalos de tempo regular (SCHMUGGE et al., 1974; JACKSON et al., 1984; ENTEKHABI et al., 1994; REICHLER et al., 2004).

Dentre as várias técnicas via sensoriamento remoto, deve-se destacar que medidas quantitativas da umidade na camada superficial do solo têm sido bem sucedidas quando utilizados sensores remotos passivos na região espectral de micro-ondas, uma vez que os sinais nesta região do espectro atravessam as nuvens e fornecem informações físicas da superfície terrestre (SCHMUGGE et al. 1974; NJOKU; KONG, 1977; SCHMUGGE, 1980; NJOKU; O'NEILL, 1982; WANG et al. 1982; CAMILLO; SCHMUGGE, 1983; JACKSON et al., 1984; NJOKU; ENTEKHABI, 1996; OWE et al., 1999; OWE et al., 2001; WIGNERON et al., 2003).

Na década de 70, Njoku e Kong (1977) desenvolveram um dos primeiros modelos para recuperar a umidade superficial do solo utilizando sensoriamento remoto por micro-ondas passiva. Alguns modelos teóricos, com graus de sofisticação variados, foram desenvolvidos para o tratamento da transferência radiativa para o solo, para a rugosidade da superfície, e para vegetação, os quais estão detalhados em Choudhury et al. (1995). No solo, a constante dielétrica depende do conteúdo de umidade, da temperatura, da salinidade, da composição textural e da frequência de medida do sensor (OWE et al., 2001). Os modelos mais utilizados para calcular a constante dielétrica são o de Wang-Schmugge (WANG E SCHMUGGE, 1980) e o de Dobson (DOBSON et al., 1985). A rugosidade da superfície (ou seja, variações de pequena escala na elevação da superfície do solo em torno de poucos centímetros) também tem um efeito significativo na emissividade do solo em micro-ondas. Um aumento da emissividade pode ser atribuído à rugosidade devido ao aumento da área superficial do solo (SCHMUGGE, 1985). Dada a dificuldade em medir a rugosidade da superfície devido à complexidade dos parâmetros biofísicos, alguns modelos foram desenvolvidos para estimar seus efeitos na emissividade. Um modelo para calcular a rugosidade foi elaborado por Choudhury et al. (1979) e, posteriormente, aprimorado

por Wang e Choudhury (1981). Schneeberger et al. (2004) desenvolveram um modelo de transição ar-solo com base física para quantificar a rugosidade da superfície. A vegetação influencia a emissão do solo em micro-ondas, emitindo sua própria radiação e também absorvendo ou espalhando a radiação emitida do solo. A magnitude da absorção pelo dossel depende do comprimento de onda e do conteúdo de água da vegetação (DE JEU, 2003). Vários modelos têm sido desenvolvidos para calcular os efeitos da vegetação no sinal observado em micro-ondas, baseados na equação de transferência radiativa (MO et al., 1982; JACKSON et al., 1982; JACKSON; O'NEILL, 1990; NJOKU; Li, 1999; OWE et al., 2001; MEESTERS et al., 2005). No entanto, a base desses vários modelos para calcular a emissão da radiação em micro-ondas pelo solo e o seu efeito na vegetação têm sido descritos pelo modelo ω - τ (MO et al., 1982). Este modelo estima a radiação, em micro-ondas, observada no solo com dada composição e conteúdo de água, coberto por uma camada de vegetação, a partir da profundidade óptica e do albedo de espalhamento simples. Assim sendo, pesquisas têm sido realizadas para estimar a umidade do solo, a profundidade óptica e a temperatura de superfície através do modelo ω - τ (OWE et al., 2001; DE JEU, 2003; MEESTERS et al., 2005). A física envolvida neste modelo é descrita mais detalhadamente em ROSSATO (2010). Considerando que os efeitos da vegetação, da rugosidade da superfície e do solo têm um papel significativo na emissão da superfície em micro-ondas, diferentes aproximações têm sido desenvolvidas em diversos algoritmos de recuperação da umidade do solo. Tais algoritmos são conhecidos como modelos de emissão em micro-ondas da superfície terrestre (Land Surface Microwave Emission Model - LSMEM), os quais são utilizados para inferir a umidade do solo a partir da temperatura de brilho. A base destes modelos é o modelo de transferência de ordem zero Omega-Tau (ω - τ) desenvolvido por Mo et al. (1982).

O modelo ω - τ é uma aproximação simples que está baseado em dois parâmetros de entrada: ω , que representa os efeitos do espalhamento dentro do dossel (albedo de espalhamento simples); e τ , que representa a profundidade óptica da camada de vegetação. Baseado neste modelo, Owe et al. (2001) desenvolveram um algoritmo para estimar a umidade do solo e a profundidade óptica a partir de dados de satélite obtidos por radiômetros em micro-ondas, o qual foi definido como "Land Parameter Retrieval Model" (LPRM) - Modelo de inferência dos parâmetros de superfície. O LPRM está baseado nas meto-

dologias (OWE et al., 2001, DE JEU, 2003, MEESTERS et al., 2005) propostas para estimar a umidade do solo e a profundidade óptica da vegetação a partir de micro-ondas passiva. A base do LPRM é o modelo de transferência de ordem zero Omega-tau (MO et al., 1982) como o modelo de transferência radiativa. Este modelo utiliza vários parâmetros de entrada para estimar a temperatura de brilho incluindo a temperatura da vegetação, temperatura efetiva da camada emissora da superfície do solo, albedo de espalhamento simples, emissividade da superfície do solo e transmissividade da vegetação. Este algoritmo foi testado para algumas localidades de Illinois, utilizando dados históricos de temperatura de brilho do sensor SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer) na frequência de 6,6 GHz.

Em outro estudo, De Jeu (2003) estimou os parâmetros de superfície, tais como umidade do solo, temperatura do solo e profundidade óptica da vegetação, utilizando o LPRM com dados de diferentes frequências (6,6, 10,7, 18, 21 e 37 GHz) do satélite Nimbus/SMMR. O LPRM também foi utilizado por Owe et al. (2008) para a estimativa da umidade do solo em escala global, utilizando diferentes sensores em micro-ondas passiva.

Assim, considerando que o LPRM foi desenvolvido para aplicação em escala global para recuperar parâmetros de superfície através de observações de diferentes sensores, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para avaliar o algoritmo em regiões distintas, como, por exemplo, por Champagne et al. (2011) e Rossato et al. (2011).

Champagne et al. (2011) avaliaram os extremos de umidade do solo na agricultura em diferentes sítios do Canadá, utilizando o LPRM. A umidade do solo foi obtida a partir de observações do sensor AMSR-E (bandas C e X) e validada com dados "in situ". Além disso, um método para quantificar extremos de umidade do solo foi desenvolvido e avaliado com medidas de precipitação. A partir dos resultados, concluiu-se que o LPRM apresentou maior acurácia quando utilizado com dados do AMSR-E banda C.

Verificação similar foi observada por Rossato et al. (2011) que estimaram a umidade superficial do solo para a América do Sul durante o ano de 2003 a partir de informações de dois diferentes sensores em micro-ondas, TMI/TRMM (banda X) e AMSR-E/Aqua (bandas C e X). A partir dos resultados, observou-se que a diferença entre a umidade do solo estimada pelo LPRM a partir dos dados obtidos da banda C foi mais apropriada para a recuperação da umidade do solo que a banda X, em conformidade com o estabelecido na literatura que frequên-

cias menores permitem inferir informações mais acuradas da umidade do solo. No entanto, os autores ressaltaram que a metodologia utilizada para a determinação da temperatura de superfície refere-se às condições específicas da América do Norte. Logo, considerando que a temperatura de superfície é uma das variáveis determinantes no LPRM para a inferência da umidade do solo, Rossato et al. (2011) concluíram que estudos complementares sobre a avaliação do LPRM tornam-se imprescindíveis para melhor controlar os padrões sazonais e melhor compreender a qualidade dos produtos de umidade do solo em diferentes regiões, principalmente para o território brasileiro devido à sua grande extensão territorial.

Assim sendo, o objetivo deste trabalho foi aprimorar o LPRM para estimar a umidade superficial do solo para o Brasil considerando as características da superfície terrestre, cuja avaliação inclui as seguintes etapas: desenvolver um procedimento desacoplado do LPRM, considerando dados de temperatura observada do solo (para a profundidade de 5 cm) e de temperatura de brilho em 37 GHz do satélite Aqua sobre o território nacional, para estimar a temperatura da camada de emissão; incluir as propriedades físicas do solo extraídas do Levantamento e Reconhecimento de Solos da EMBRAPA e do Projeto RADAMBRASIL; e, finalmente, avaliar o padrão de umidade do solo obtida a partir das informações de temperatura de brilho obtidos do sensor em micro-ondas (AMSR-E/Aqua - banda C). Os resultados da umidade superficial do solo derivados da nova versão do LPRM foram validados com dados observados de umidade do solo coletados durante o Experimento de Umidade do Solo realizado em 2003 (Soil Moisture Experiment 03 – SMEX03) no município de Barreiras, localizado no Estado da Bahia; e dados do sítio experimental Pé de Gigante, no Estado de São Paulo, cuja vegetação predominante em ambas as localidades é o Cerrado. Dados de reanálise da umidade do solo, oriundos do modelo atmosférico regional Eta, e de precipitação observada também foram utilizados na avaliação da versão atualizada do LPRM.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados

As diferentes bases de dados utilizadas para a calibração e obtenção de novos resultados com o LPRM são descritas abaixo.

Satélite Aqua/AMSR-E

O sensor AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer), a bordo do satélite Aqua desde 2002, é um radiômetro passivo em micro-ondas, de varredura cônica em 12 canais, que mede as radiações polarizadas verticalmente e horizontalmente nas frequências de 6,9, 10,7, 18,7, 23,8, 36,5 e 89,0 GHz. O satélite Aqua opera em órbita polar heliosíncrona, com passagem pelo Equador às 13:30 h e ângulo de incidência de 54,8° (NJOKU et al., 2003).

Neste estudo, para calibrar o algoritmo de temperatura de superfície e avaliar o padrão sazonal da umidade do solo obtida com o LPRM no território brasileiro, dados de temperaturas de brilho polarizadas verticalmente e horizontalmente foram extraídas do sensor AMSR-E nas frequências de 6,9 e 37 GHz durante o ano específico de 2003. Este ano foi considerado por ter sido o mesmo período utilizado por Rossato (2010) para avaliar a distribuição espaço-temporal da umidade superficial do solo para a América do Sul.

Temperatura do solo

Dados medidos de temperatura do solo (5 cm de profundidade), durante o ano de 2003, foram coletados de 2 sítios experimentais no território brasileiro: Fazenda Experimental Bacia Escola, localizada no Estado da Paraíba, e Estação Meteorológica da Água Funda, em São Paulo. Estes dados foram comparados com a temperatura de brilho do satélite AMSR-E em 37 GHz, cujas passagens foram próximas aos sítios selecionados. No entanto, conforme ressaltado por Owe et al. (2001), para esta comparação torna-se necessário que os horários das observações "in situ" da temperatura do solo e da temperatura de brilho obtida pelo satélite sejam coincidentes. Por essa razão, para o presente estudo dispôs-se de um número muito reduzido de sítios experimentais se considerado a extensão do território nacional. Isto ocorre, pois, além da escassez de dados observados, também é preciso dispor de informações de satélite ao mesmo tempo.

Dados de temperatura do solo coletados da Fazenda Experimental Bacia Escola (7°22'S; 36°31'W; 458m) durante o período de janeiro a dezembro de 2003 foram utilizados para a calibração do LPRM. Esta região encontra-se num domínio cujo tipo de bioma é a caatinga e o tipo de solo é o neossolo lítico. O clima é semiárido, o qual é caracterizado pela baixa umidade e pouco volume pluviométrico, segundo a classificação de Köppen. A

média de precipitação é de 400,0 mm/ano, e a umidade relativa do ar é de 70%. (ARAÚJO et al., 2005). Dados de temperatura do solo registrados na Estação Meteorológica da Água Funda, em São Paulo, SP (23°39'S; 46°37'W; 800m) durante o período de julho a setembro de 2003 também foram utilizados para o ajuste do LPRM (AZEVEDO e GALVANI, 2003). O clima é considerado subtropical (tipo Cfa segundo Köppen), com diminuição de chuvas no inverno e temperatura média anual de 19,25 °C, tendo invernos brandos e verões com temperaturas moderadamente altas, aumentadas pelo efeito da poluição e da altíssima concentração de edifícios na região de entorno. A precipitação anual média é de 1.376,2 mm concentrados principalmente no verão. As estações do ano são relativamente bem definidas: o inverno é ameno e subseco, e o verão, moderadamente quente e chuvoso. Outono e primavera são estações de transição.

Propriedades físicas do solo

Outra característica importante para a estimativa da constante dielétrica do solo, a qual é função da umidade do solo, refere-se às propriedades físicas do solo.

No LPRM, a constante dielétrica é calculada segundo o modelo de Wang-Schumgge (1980), utilizando dados das propriedades físicas do solo (tais como os percentuais de areia, silte, argila e porosidade) coletados da base de dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (Food and Agriculture – FAO) através do Sistema de Assimilação de Dados Terrestre (Land Data Assimilation System - LDAS).

Assim, para calcular a constante dielétrica do solo através do modelo de Wang-Schumgge (1980), incluiu-se informações sobre os conteúdos de areia e de argila e da porosidade dos solos, extraídas a partir de dados de Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Brasil realizados pelo Projeto RADAMBRASIL e pela EMBRAPA.

Os levantamentos pedológicos realizados pelo RADAMBRASIL e pela Embrapa, em conformidade com as normas seguidas pelo Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, visaram a identificação e o levantamento dos solos existentes no Brasil. Os solos foram amostrados determinando-se a profundidade dos horizontes, o tipo de solo, o tipo de vegetação, o tipo de relevo, etc. Para cada horizonte foram efetuadas análises

Tabela 1 - Descrição dos atributos dos solos considerados na base de dados.

Nº Perfil	Latitude	Longitude	Tipo Solo	Horizonte	Profundidade Inferior	Profundidade Superior	Arcia grossa	Arcia fina	Silte	Argila
1	-16°24'	40°49'	LAa	A1	0	13	49	7	8	36
1	-16°24'	40°49'	LAa	A3	13	30	47	8	8	37
1	-16°24'	40°49'	LAa	B1	30	45	37	8	6	49
1	-16°24'	40°49'	LAa	B21	45	75	24	7	4	65
1	-16°24'	40°49'	LAa	B22	75	105	24	7	2	67

físicas (textura, estrutura, etc) e químicas (matéria orgânica, macro e micro nutrientes, carbono, etc).

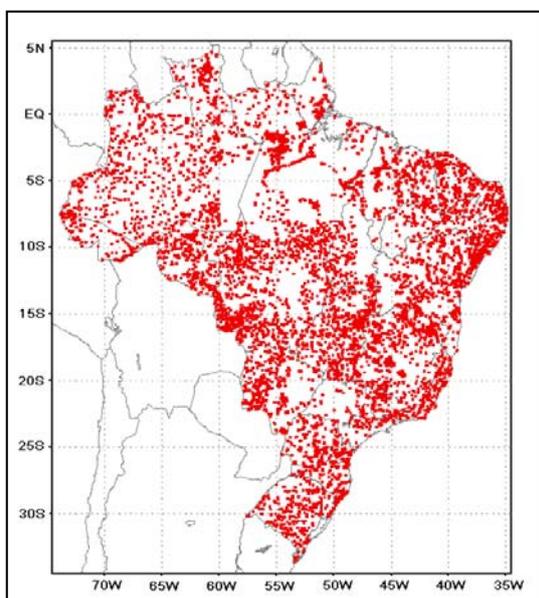


Figura 1 - Localidades com dados de propriedades físicas dos solos no Brasil. FONTE: Rossato et al. (2004).

A Figura 1 apresenta as regiões do Brasil e as localizações que dispõem de dados das propriedades básicas dos solos. Cada ponto na Figura 1 indica a localização de um perfil de solo, o qual inclui a descrição dos atributos de solos citados na Tabela 1.

METODOLOGIA

LPRM

O LPRM está baseado nas metodologias (OWE et al., 2001, DE JEU, 2003, MEESTERS et al., 2005) propostas para estimar a umidade do solo e a

profundidade óptica da vegetação a partir de micro-ondas passiva, de modo similar ao proposto pelo algoritmo de inferência SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity).

A base física do LPRM é o modelo de transferência de ordem zero Omega-tau (MO et al., 1982) como modelo de transferência radiativa. Este modelo utiliza vários parâmetros de entrada para estimar a temperatura de brilho, incluindo a temperatura da vegetação, temperatura efetiva da camada emissora da superfície do solo, albedo de espalhamento simples, emissividade da superfície do solo e transmissividade da vegetação. Matematicamente, neste modelo, a temperatura de brilho é calculada pela Equação 1.

$$T_{b(0)} = T_s \Gamma_s + (1 - \alpha_b) T_c (1 - \Gamma_v) + (1 - \epsilon_{(0)}) (1 - \alpha_b) T_c (1 - \Gamma_v) \Gamma_{(0)} \tag{1}$$

em que T_s e T_c são as temperaturas do solo e do dossel, respectivamente, ω é o albedo de espalhamento simples, Γ a transmitância do dossel e l é a polarização vertical ou horizontal. Uma descrição mais detalhada da metodologia do LPRM pode ser encontrada em Rossato et al. (2011).

No entanto, considerando que o LPRM foi desenvolvido a partir de informações da América do Norte, o presente trabalho apresenta uma nova versão para o algoritmo de inferência da umidade do solo, a qual considera as características da superfície terrestre para o território brasileiro. Para isso, dados de temperatura do solo (5 cm) e das propriedades físicas do solo foram utilizados para a obtenção de uma nova relação linear para a temperatura de superfície e da constante dielétrica do solo, respectivamente. A Figura 2 apresenta um diagrama simplificado do algoritmo de recuperação da umidade superficial do solo.

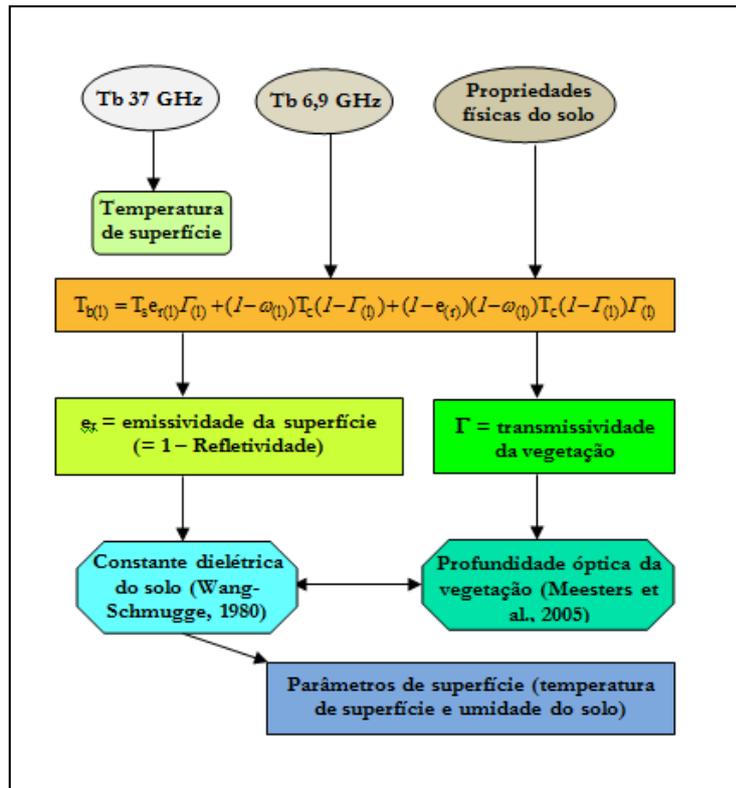


Figura 2 - Representação esquemática do algoritmo de inferência da umidade superficial do solo (LPRM/BR).

Temperatura de superfície

A temperatura de superfície consiste de uma importante variável nos modelos de transferência radiativa para inferir informações de umidade do solo e profundidade óptica da vegetação. No entanto, este parâmetro raramente é medido em estações climáticas e as estimativas de modelos numéricos apresentam um baixo nível de precisão e são, frequentemente, predispostas a grandes erros. Além disso, mesmo que existam medições em campo, elas ainda são pontuais e não fornece a informação distribuída espacialmente, o que normalmente são exigidas em diferentes aplicações.

Técnicas tradicionais utilizam medidas pontuais de temperaturas do ar e do solo para obter a temperatura média da superfície do solo espacialmente, mas estas técnicas introduzem grandes erros devido à sua variabilidade espacial.

Desse modo, o sensoriamento remoto é uma ferramenta promissora para obtenção da representatividade espacial da temperatura de superfície. A técnica tradicional para medir temperatura da superfície por satélite é a infravermelha térmica. No entanto, uma grande desvantagem desta técnica é

que nuvens e outros fenômenos atmosféricos podem perturbar e, muitas vezes, mascarar completamente o sinal. Por essa razão, o sensoriamento remoto por micro-ondas passiva é uma ferramenta mais promissora, uma vez que a atmosfera afeta muito menos o sinal em micro-ondas (VAN DE GRIEND et al., 1998; NJOKU e LI, 1999; OWE e VAN DE GRIEND, 2001; VAN DE GRIEND, 2001). A grande vantagem desta técnica é a não influência das condições atmosféricas e, assim, não requer nenhuma correção. No entanto, uma desvantagem é a necessidade de estimativas da emissividade da superfície que, por sua vez, depende da umidade do solo através da constante dielétrica. No estudo de Owe et al. (2001), a temperatura da camada de emissão foi estimada a partir de observações na frequência de 37 GHz, utilizando-se um procedimento desacoplado do algoritmo de recuperação da umidade superficial do solo. Nesta frequência (polarizada verticalmente em 37 GHz), verificaram que o valor máximo da emissividade é de aproximadamente 0,96 para os ângulos de incidência do TRMM e do SMMR, os quais são 52,8° e 50,3° respectivamente. Assim, concluíram que a emissividade (apesar de diminuir com a umidade do solo) sempre estará acima de 0,9 para esta

frequência, até mesmo para condição de saturação. Consequentemente, o efeito da umidade do solo para esta frequência é pequeno e a emissividade é predominantemente uma função da temperatura de superfície. Baseado nesta consideração, a temperatura de brilho em 37 GHz foi comparada com medidas de temperatura do solo obtidas a partir de observações em campo e de satélite.

Conforme já ressaltado, para comparar a temperatura de brilho em 37 GHz com medidas de temperatura do solo, torna-se necessário dispor de observações de campo e da passagem do satélite ao mesmo tempo. Desse modo, para a estimativa da temperatura de superfície do LPRM original, que considera a metodologia proposta por Owe et al. (2001), foram coletados dados de temperatura do solo na profundidade de 5 cm em 8 sítios de Oklahoma (EUA) e posterior comparação com a temperatura de brilho do satélite TRMM em 37 GHz, cujas passagens são próximas aos sítios selecionados.

Uma relação linear entre a temperatura do solo a 5 cm e a temperatura de brilho em 37 GHz foi obtida para todas as estações de Oklahoma, a qual é descrita abaixo:

$$T_{s[5cm]} = 0,754T_{b(37GHz)} + 82,043 \quad (2)$$

Essa relação tem um coeficiente de correlação de 0,84 e um erro padrão de 3,64 K, para 1881 pontos. Segundo Owe et al. (2001), as diferenças na umidade do solo e o tipo de solo não parece ter uma influência considerável nesta relação, mas as discrepâncias observadas foram devido à resolução espacial dos dados (pontuais para os observados e média do pixel para os derivados de satélite).

No entanto, as temperaturas do solo a 5 cm de profundidade não são representativas da umidade do solo em 6,6 GHz. Assim, uma relação entre a temperatura do solo em 5 e 1,25 cm foi calculada utilizando-se outro conjunto de observações (em solos nu e com vegetação) para obter a relação final entre as temperaturas do solo em 1,25 cm e as observações por satélite em 37 GHz.

$$T_{s[1,25cm]} = 1,142T_{s[5cm]} - 41,143 \quad (3)$$

Combinando as Equações 2 e 3, Owe et al. (2001) encontraram uma relação entre as observações na frequência em 37 GHz polarizada verticalmente e a temperatura do solo (profundidade de 1,25 cm), cuja equação é dada por:

$$T_s = 0,861T_{b(37GHz) [v]} + 52,55 \quad (4)$$

A equação acima foi utilizada para calcular a temperatura de emissão da camada da superfície para a profundidade de 1,25 cm. Esta equação pode ser utilizada em escala global para calcular a temperatura da camada emissora em 6,6 GHz. No entanto, a relação acima está baseada em medidas de temperatura do solo obtidas em sítios dos EUA.

Assim, com o intuito de avaliar a temperatura de superfície derivada a partir das observações em micro-ondas sobre o continente sul-americano, Rosato (2010) observou que o LPRM superestimou a temperatura de superfície em aproximadamente 6 a 10 K.

Portanto, para garantir a confiabilidade dos resultados e, principalmente, da aplicação do algoritmo de recuperação da temperatura de superfície, torna-se necessário avaliar com mais detalhes a capacidade de recuperação do algoritmo considerando as características da superfície terrestre do Brasil.

Para desenvolver um novo algoritmo para estimativa da temperatura de superfície para o território brasileiro foram consideradas informações de temperatura medidas “in situ” e as derivadas por satélite em 37 GHz. Com relação aos dados de temperatura de brilho em 37 GHz, estas foram derivadas a partir das observações do sensor AMSR-E, selecionando-se as passagens mais próximas dos sítios selecionados. A partir dessas informações, uma nova relação linear foi determinada para calcular a temperatura de superfície e acoplada ao LPRM, considerando as características oriundas do território brasileiro.

Validação

A qualidade dos produtos de umidade do solo derivados do sensor AMSR-E depende da validação com dados medidos “in situ”. Portanto, para este estudo foram utilizados dados de umidade do solo coletados durante o Experimento de Umidade do Solo em 2003 (Soil Moisture Experiment 03 – SMEX03) realizado no município de Barreiras, localizado no Estado da Bahia, Brasil. Além destes, dados de outro sítio experimental, Pé de Gigante (localizado no Estado de São Paulo), foi selecionado para a validação.

O Experimento SMEX03 selecionou uma sub-região de Cerrado como área de estudo, com o objetivo de entender a influência da umidade do solo e das culturas nas interações entre a superfície da Terra e a atmosfera. Para isso, dados de umidade do solo (média diária) foram coletados em cinco diferentes pontos (BA-06, BA-10, BA-11, BA-13 e BA-17) durante seis dias consecutivos, de 02 a 08 de

dezembro de 2003; exceto em três sítios (BA-11, BA-13, BA-17) em que ocorreram algumas falhas nas medidas. Portanto, as séries de dados estão incompletas, isto é, para o sítio BA-11 não se têm medidas para o dia 02 de dezembro; o sítio BA-13 possui dados apenas para o dia 02, enquanto o BA-17 possui medidas até o dia 05 de dezembro. Assim sendo, no presente trabalho, os sítios BA-13 e BA-17 não foram considerados para a comparação com os resultados de umidade do solo derivados a partir das observações do sensor AMSR-E, em razão da ausência de dados na série. Além das informações de umidade do solo, a base de dados coletados do SMEX03 também inclui dados de temperatura do solo (5 cm). Segundo Di Bello (2005), as medidas foram obtidas, a cada 15 minutos, utilizando-se a sonda *Theta Probe* – TP, Delta-T.

O outro sítio experimental, Pé de Gigante, está localizado em Santa Rita do Passa Quatro, Estado de São Paulo, cujas coordenadas geográficas são 21°36'44''S e 47°34'41''W. Uma torre micrometeorológica está instalada na área, onde o tipo de solo predominante é a Areia Quartzosa eutrófica e a vegetação é o cerrado (correspondendo a 79% da área). O clima é úmido no verão e no inverno é ameno e seco. De acordo com os dados disponíveis da estação meteorológica do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE/SP), a estação seca é predominante nos meses de maio a setembro, apresentando baixos índices de precipitação (BRUNO, 2004). Uma torre meteorológica de 21 m de altura foi instalada no setor noroeste do município de Santa Rita do Passa Quatro em outubro de 2000. Um refletômetro no domínio da frequência - *FDR CS615-G* (Campbell Scientific, v. 8221-07) foi utilizado para obter as informações da umidade do solo nas profundidades de 0,1, 0,2, 0,5, 0,8, 1,0, 1,5, 2,0 e 2,5 m (ROCHA et al., 2002). Os dados utilizados no presente trabalho são do período de agosto a dezembro de 2003. Portanto, considerando a quantidade de dados diários, para este sítio foi calculada a média mensal da umidade do solo.

Assim, as informações da umidade do solo obtidas pelo algoritmo LPRM original e pela versão calibrada (LPRM/BR), utilizando as observações em micro-ondas, foram comparadas com as observações de campo obtidas durante o período de dados de cada sítio experimental.

Considerando que os dados de satélites são obtidos em grade regular de 0.5°, os valores de umidade do solo (banda C) foram coletados para um pixel próximo a região dos sítios experimentais.

Rossato et al. (2004) concluíram que a variação do conteúdo de água no solo depende: dos diferentes sistemas sinóticos que atuam no Brasil em determinados períodos e regiões, os quais alteram o regime de precipitação; do tipo de cobertura vegetal predominante na área de estudo, já que esta afeta a taxa de evapotranspiração; e, conseqüentemente, da inter-relação de todas as variáveis que constituem o sistema solo-planta-atmosfera. Assim sendo, a precipitação pode ser considerada como um fator dirigente da umidade do solo.

Portanto, na ausência de dados de umidade do solo obtidos “in situ” sobre o território brasileiro, as séries temporais de umidade do solo derivada do LPRM e LPRM/BR também foram comparadas com dados de reanálise da umidade do solo do modelo Eta e com dados de precipitação observada disponíveis no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

A base de dados de precipitação observada, disponibilizada pelo CPTEC/INPE, consiste de uma série de dados de precipitação mensal acumulada do ano de 2003. As grades de precipitação interpolada (1° x 1°) sobre a América do Sul são criadas a partir de dados de precipitação de diversas estações. Os dados de precipitação são coletados diariamente e a chuva é acumulada em 24 horas, sendo estas 24 horas definidas entre as 12UTC de um determinado dia e do dia anterior.

Com relação à base de dados de umidade do solo, as Reanálises Regionais da América do Sul foram geradas a partir do modelo regional Eta do CPTEC/INPE, com resolução espacial de 40 km e 38 níveis na coordenada vertical eta. A reanálise foi realizada com o sistema de assimilação RPSAS (Regional Physical Space Statistical Analysis System), desenvolvido no CPTEC a partir do PSAS. Mais informações sobre o sistema de análises podem ser vistas em Cohn et al. 1998. Mais informações sobre o modelo Eta podem ser vistas em Black, 1994 e em Mesinger et al., 1988. Os produtos derivados das reanálises, para o período de 2000-2004, podem ser acessados livremente no site ftp://lba.cptec.inpe.br/lba_archives/PC/PC-404/regional_reanalysis/. Descrições mais detalhadas destas bases de dados podem ser encontradas em Rossato et al. (2011).

Para a validação, valores médios mensais para (i) estação chuvosa (Janeiro e Abril) e (ii) estação seca (Julho e Outubro) foram considerados neste estudo. Finalmente, para verificar o impacto das características da superfície terrestre no Brasil, ferramentas estatísticas foram utilizadas para avaliar o desempenho do LPRM e LPRM/BR em relação às

demais base de dados (umidade do solo, observada e a obtida pela reanálise do modelo Eta, e precipitação). A fim de verificar o grau de associação, utilizou-se o coeficiente de correlação. Outro método muito utilizado para estimar a magnitude do erro da simulação é o método da raiz do erro médio quadrático imparcial (REM_{QM}), proposto por Pielke (2002).

Outra estatística utilizada para calcular o erro sistemático das simulações em relação aos dados observados é o BIAS médio. Este é calculado como a diferença entre os dados observados e os dados simulados.

Assim sendo, a partir das estatísticas apresentadas acima, avaliou-se o desempenho das versões original e atualizada do LPRM com a utilização de diferentes dados observacionais de umidade do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que cada região e/ou continente possui características distintas, o objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto das características da superfície terrestre nos produtos de temperatura de superfície e de umidade do solo derivada a partir do LPRM, utilizando observações do sensor AMSR-E (banda C).

Para calibrar o LPRM considerando as características dos solos do Brasil, um novo procedimento desacoplado do LPRM foi desenvolvido para estimar a temperatura da camada de emissão, o qual utiliza dados de temperatura observada do solo (para a profundidade de 5 cm) e de temperatura de brilho em 37 GHz do satélite Aqua sobre o território nacional.

Para comparar a temperatura de brilho 37 GHz a medições de temperatura do solo, é necessário ter observações de campo, ao mesmo tempo e localização da passagem do satélite. Assim, dados de temperaturas do solo (T_s), selecionados a partir de dois diferentes sítios no Brasil (Fazenda Experimental Bacia Escola, localizada no Estado da Paraíba, e Estação Meteorológica da Água Funda, em São Paulo), foram comparados com os dados de temperaturas de brilho (T_b), polarizada verticalmente, em 37 GHz do satélite AMSR-E. Desse modo, uma nova relação linear entre T_s e T_b foi obtida a partir das informações das estações do Brasil e inserida no LPRM, cuja equação é dada por:

$$T_s = 0,4883 T_{b(37\text{ GHz})} + 168,73 \quad (5)$$

em que T_b é a temperatura de brilho polarizada verticalmente para a frequência de 37 GHz.

A distribuição espaço-temporal da temperatura de superfície obtida pelo LPRM/BR para todo o território brasileiro, durante os meses representativos das diferentes estações do ano (Janeiro, Abril, Julho e Outubro) do ano de 2003, é apresentada na Figura 3. Os valores médios mensais dos pixels foram calculados através das passagens diárias ascendentes e descendentes, totalizando 738 passagens sobre o território brasileiro durante as estações chuvosa e seca. A partir dos resultados, observa-se que durante o mês de janeiro a temperatura de superfície é alta para quase todo o território. A partir de abril, as temperaturas diminuem em algumas regiões do Sul e Sudeste do Brasil. No mês de julho, além das regiões Sul e Sudeste, também surgem algumas áreas no Centro-Oeste do Brasil com temperaturas mais amenas. Porém, deve-se ressaltar que este período coincide com a estação outono-inverno do Hemisfério Sul. Em outubro, as regiões caracterizadas por baixas temperaturas são reduzidas nas regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul; enquanto que, para as regiões Norte e Nordeste, as temperaturas permanecem elevadas. Este regime de temperatura é caracterizado pelo período de transição entre a estação seca e a estação chuvosa do Brasil.

No entanto, para garantir a confiabilidade dos resultados e, principalmente, da aplicação do algoritmo de recuperação da temperatura de superfície, deve-se acrescentar observações “*in situ*” a fim de se avaliar com mais detalhes a capacidade de recuperação do algoritmo e, conseqüentemente, verificar quais as possíveis melhorias obtidas.

Assim, os dados de temperatura de superfície derivados do LPRM e LPRM/BR, obtidos a partir das informações do sensor AMSR-E, foram validados com os dados observados Experimento SMEX03. Considerando que os dados de satélites são obtidos em grade regular de $0,5^\circ$, os valores de temperatura de superfície foram extraídos para um pixel próximo à região dos sítios experimentais BA-06, BA-10 e BA-11, cujas coordenadas geográficas são -12° de latitude e $-45,2^\circ$ de longitude.

A Figura 4 ilustra a variação média diária das temperaturas de superfície derivadas pelos algoritmos LPRM e LPRM/BR (médias diárias das passagens ascendentes e descendentes), utilizando as informações do sensor AMSR-E em 37 GHz, e as medidas (média das observações coletadas em diferentes horários) obtidas durante o experimento SMEX03 para os sítios BA-06, BA-10 e BA-11 durante o período de 2 a 8 de dezembro de 2003. Os resulta-

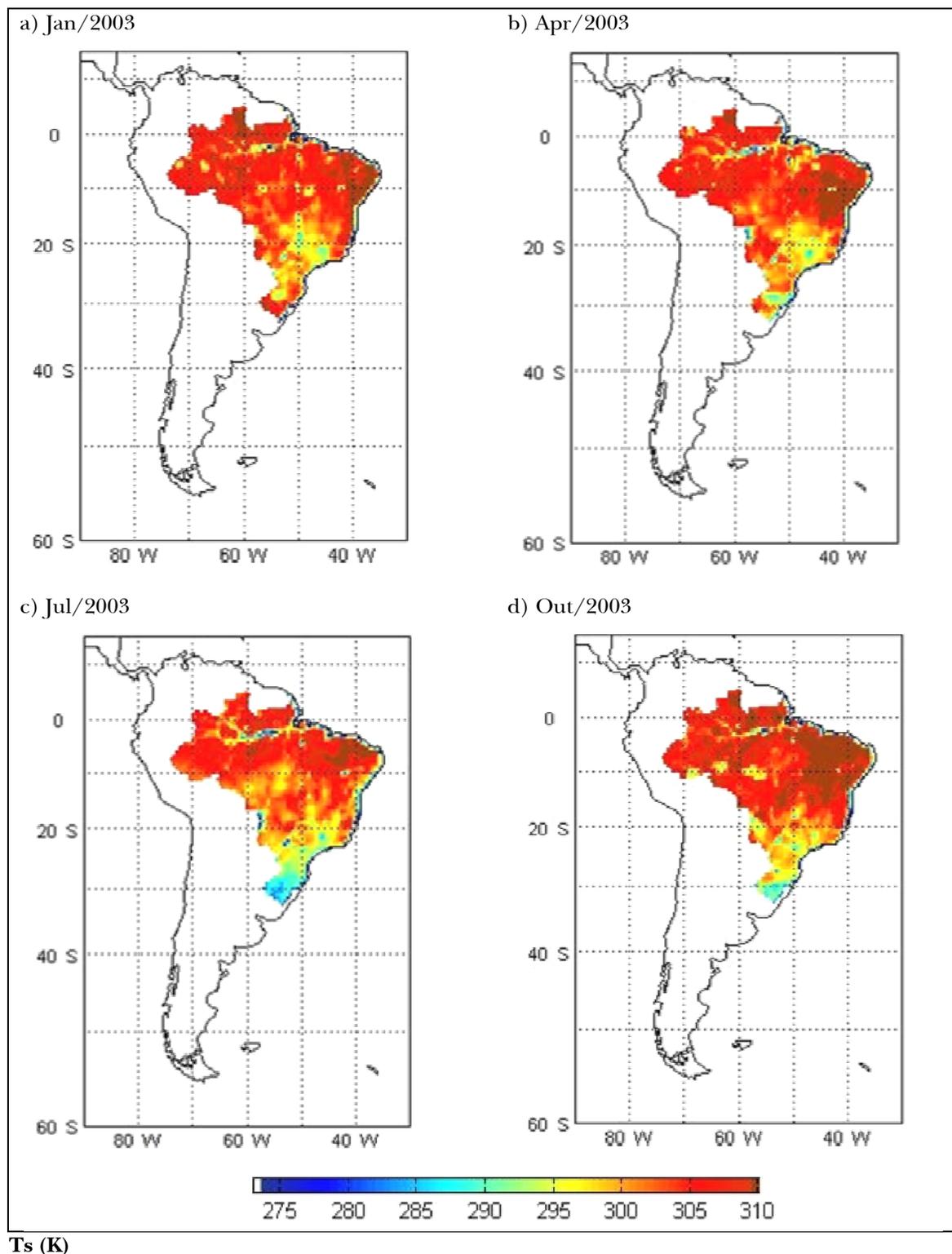


Figura 3 - Distribuição espaço-temporal da temperatura de superfície (K) corrigida para as condições da superfície terrestre para o Brasil, a qual foi derivada das observações do sensor AMSR-E durante os meses de janeiro a dezembro de 2003.

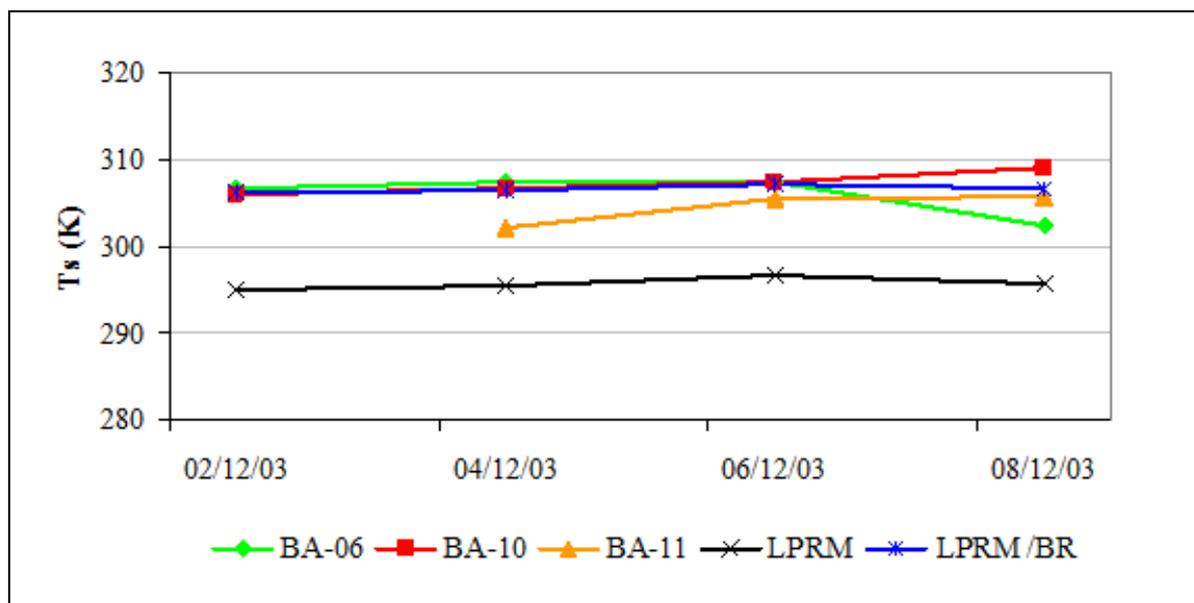


Figura 4 - Séries temporais das temperaturas do solo (5cm), média diária, obtida para os sítios BA-06, BA-10, BA-11 no escopo do experimento SMEX03 e aquelas (superfície) derivadas pelo algoritmo LPRM original e calibrado (LPRM/BR).

Tabela 2 - Coeficientes de correlação (R), BIAS e raiz do erro médio quadráticos imparcial (REM_Q) obtidos a partir dos dados de temperatura de superfície derivada pelo LPRM e pelo LPRM/BR, utilizando-se dados do sensor AMSR-E (banda C), e dados medidos “in situ” em cada sítio experimental do SMEX03.

Sítios	LPRM			LPRM/BR		
	R	BIAS	REM _Q	R	BIAS	REM _Q
		(K)	(K)		(K)	(K)
BA-06	-0,03	-10,21	0,83	-0,05	-0,7	0,45
BA-10	0,52	-11,48	0,49	0,52	0,58	0,27
BA-11	0,74	-8,68	0	0,77	-2,22	0

dos mostram que os valores de T_s obtidas com o LPRM estão subestimados em relação aos dados observados; enquanto que o LPRM/BR produziu uma série de dados próximos aos valores obtidos nos sítios experimentais do SMEX03.

Para melhor avaliar o grau de associação entre os resultados de temperatura de superfície do LPRM e os observados, calcularam-se os coeficientes de correlação, BIAS e o REM_Q para cada sítio do SMEX03, cujos valores são apresentados na Tabela 2. De acordo com os resultados, observa-se que,

tanto para o LPRM como para o LPRM/BR, o sítio BA-11 mostrou valores de correlação mais significativos do que o sítio BA-06 e BA-10. No entanto, a melhor correlação ($r=0,77$) foi obtida quando se comparou o LPRM/BR com os dados medidos no sítio BA-11. Conforme ressaltou Rossato (2010), embora os sítios experimentais estejam localizados dentro de um mesmo município, tais divergências podem ser decorrentes das diferenças nas resoluções espacial e temporal entre os dados observados (pontuais) e o de satélite (pixel de $0,5^\circ$). Portanto,

os melhores resultados estatísticos (R, bias e REMQ) foram obtidos para a temperatura de superfície derivada do LPRM/BR no sítio BA-11.

Outra característica que também deve ser ressaltada é a subestimativa da temperatura de superfície (aproximadamente 10 K) derivada pelo LPRM. Os resultados obtidos com o LPRM/BR mostram que este problema foi solucionado (com desvio de aproximadamente 1 K), quando se utilizou a relação linear ajustada com dados do território brasileiro (Equação 5).

Considerando que além da temperatura de superfície, a constante dielétrica do solo também é um dos parâmetros de entrada utilizados para a estimativa da umidade do solo, dados das propriedades físicas do solo do território brasileiro foram incluídos, uma vez que estes são funções diretas da constante dielétrica do solo.

Para o cálculo da constante dielétrica, o LPRM utiliza o modelo de Wang-Schmugge (1980), o qual depende das informações sobre os conteúdos de areia e de argila e da porosidade dos solos. Os dados pontuais destas propriedades físicas do solo, oriundos dos levantamentos pedológicos realizados pelo RADAMBRASIL e pela Embrapa, foram interpolados na resolução espacial de 0,5°, utilizando o método Krigging (OLIVER e WEBSTER, 1990). Desse modo, as informações pedológicas foram inseridas no algoritmo de inferência da umidade superficial do solo (LPRM) para obter novos resultados do conteúdo de água volumétrica para a camada superficial (aproximadamente em 2 cm).

Assim sendo, a umidade superficial do solo foi derivada a partir do LPRM/BR para todo o território nacional, utilizando as observações do sensor AMSR-E (banda C) para o ano de 2003, conforme ilustrado na Figura 5. Os valores médios mensais da umidade do solo durante os meses de estação chuvosa (Janeiro e Abril) e seca (Julho e Outubro) foram obtidos similarmente ao calculado para a Figura 3, conforme mencionado anteriormente.

A fim de avaliar os padrões sazonais da umidade do solo para o Brasil, consideraram-se apenas os meses de maior representatividade das estações do ano (janeiro, abril, julho e outubro). Assim, nos meses representativos da estação chuvosa (Fig. 5a e 5b), observam-se valores do conteúdo de água no solo superior a $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ em quase todo o continente brasileiro, incluindo a região Nordeste do Brasil. Nesta região, o aumento de água no solo ocorre devido ao período da estação chuvosa, que tem início em fevereiro e estende-se até o mês de maio. Durante este período, o principal sistema causador de chuvas nesta sub-região é a zona de convergência

intertropical (ZCIT). Para os meses representativos da estação seca (Fig. 5c e 5d), com exceção das regiões Norte e Sul, verifica-se uma diminuição da umidade do solo em diversas áreas das regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil. No entanto, ressalta-se que, além da diminuição da umidade do solo durante os meses de baixa precipitação (julho e outubro), algumas áreas da região Norte, Sul e Sudeste também permaneceram com baixos índices de umidade do solo ($< 0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) durante os meses janeiro e abril (meses de estação chuvosa). Provavelmente, este resultado pode ter sido influenciado pelo alto conteúdo de água da vegetação. Com o intuito de apresentar uma distribuição espacial e temporal mais realista e confiável da umidade do solo, considerou-se uma máscara que elimina os dados incertos em áreas que possuem vegetação densa (região Amazônica) ou que apresentam erros excessivos. Tal máscara foi aplicada considerando o estudo realizado por Njoku e Li (1999), que verificaram que o limite para detectar as variações na umidade do solo em 6,6 GHz é alcançado quando a cobertura vegetal tem conteúdo de água da vegetação (VWC) de $1,5 \text{ kg m}^{-2}$, correspondendo a uma profundidade de vegetação óptica de aproximadamente 0,75. Por essa razão, a fim de evitar erros excessivos e gerar dados não confiáveis, Rossato et al. (2011) excluíram as áreas cuja profundidade óptica da vegetação eram superiores a 0,75. Desse modo, neste trabalho, os resultados de umidade do solo obtidos pelo LPRM/BR, cuja profundidade óptica da vegetação é superior a 0,75, não foram considerados como confiáveis.

Para melhor avaliar o impacto das novas características da superfície terrestre para solos brasileiros, os resultados de umidade do solo obtidos a partir do LPRM/BR (cuja versão inclui a nova relação linear da temperatura de superfície e as propriedades físicas do solo) também foram comparados com os dados observados de umidade do solo coletados em diferentes sítios.

A Figura 6 apresenta as séries temporais de umidade do solo (médias diárias calculadas similarmente à metodologia aplicada para a obtenção da Figura 4) para cada sítio experimental do SMEX03 (BA-06, BA-10 e BA-11) e as informações derivadas pelas duas versões do LPRM, original e atualizada (LPRM/BR), obtidas a partir das observações do AMSR-E (banda C). Os resultados mostram que a série temporal da umidade do solo derivada pelo LPRM/BR aproximou-se mais das séries obtidas "in situ"; enquanto a versão original do LPRM superestimou os valores de umidade do solo nesta região de estudo.

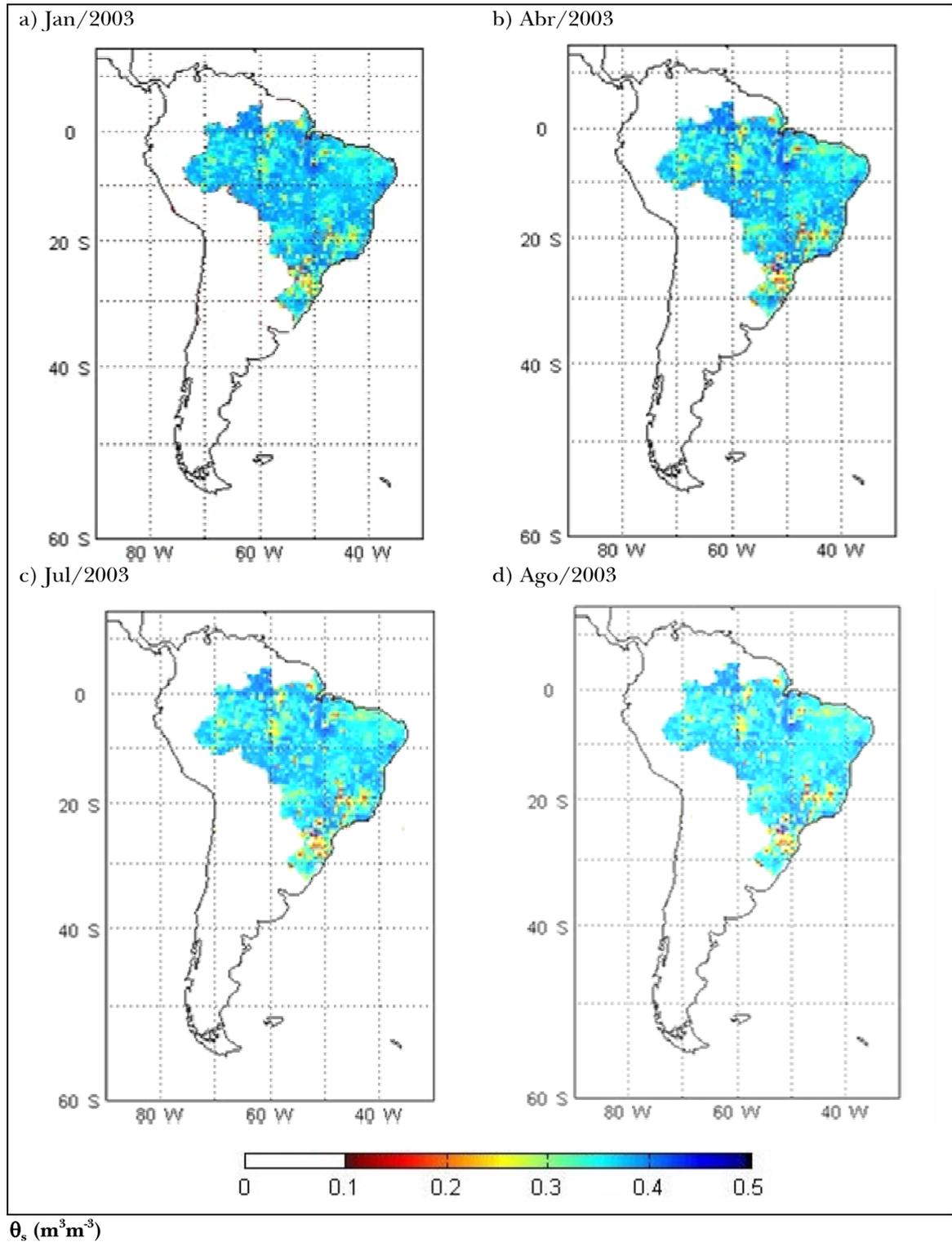


Figura 5 - Distribuição espaço-temporal da umidade superficial do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) corrigida para as condições da superfície terrestre para o Brasil (LPRM/BR), a qual foi derivada das observações do sensor AMSR-E durante os meses de janeiro, abril, julho e dezembro de 2003.

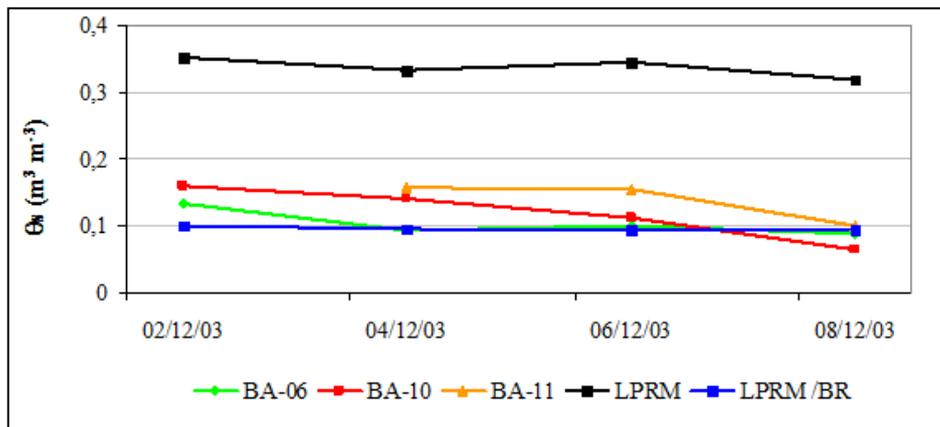


Figura 6 - Séries temporais da umidade superficial do solo (θ_s), média diária, obtida para os sítios experimentais BA-06, BA-10 e BA-11 do SMEX03 (Barreiras/BA, Brasil), e derivada pelo algoritmo LPRM e LPRM/BR durante o período de 02 a 08 de dezembro de 2003.

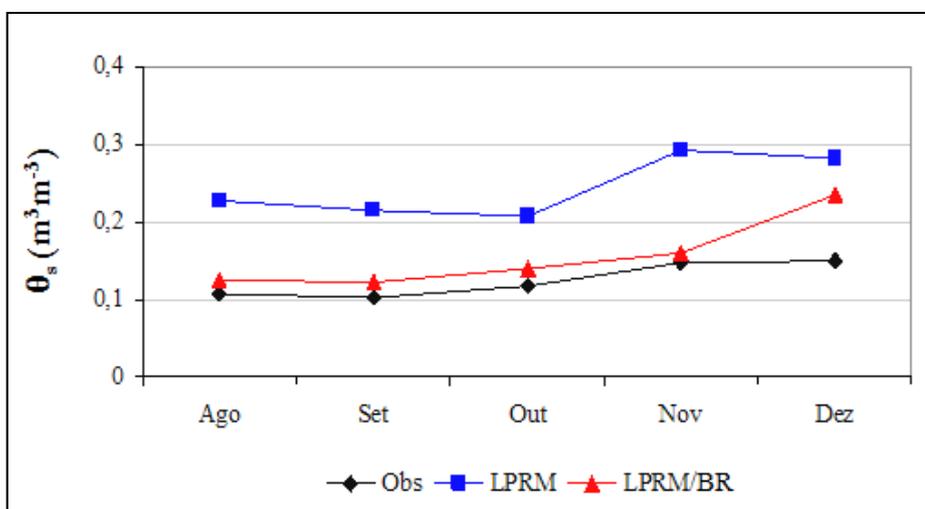


Figura 7 - Séries temporais da umidade superficial do solo, média mensal, obtida para o sítio Pé de Gigante (SP), Brasil, e a derivada pelo algoritmo LPRM e LPRM/BR durante o período de agosto a dezembro de 2003.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação (R), BIAS e raiz do erro médio quadrático imparcial (REM_Q) obtidos entre os dados de umidade superficial do solo derivada pelo sensor AMSR-E (banda C) e a medida “in situ” em sítios diferentes sítios experimentais: SMEX03 (BA-06 e BA-10) e Pé de Gigante (Santa Rita do Passa Quatro, SP).

Sítios	LPRM			LPRM/BR		
	R	BIAS	REM _Q	R	BIAS	REM _Q
		($m^3 m^{-3}$)	($m^3 m^{-3}$)		($m^3 m^{-3}$)	($m^3 m^{-3}$)
BA-06	0,78	0,23	0,47	0,94	0,01	0,13
BA-10	0,79	0,22	0,12	0,84	0,02	0,01
BA-11	0,87	0,2	0,01	0,84	0,04	0
Pé de Gigante (SP)	0,67	0,12	1,25	0,74	0,02	0,94

Dados de umidade do solo obtidos do sítio Pé de Gigante, localizado em Santa Rita do Passa Quatro (SP), também foram utilizados para a validação. As séries temporais de umidade do solo observada e a derivada pelas duas versões do LPRM, original e calibrada (LPRM/BR), estão ilustradas na Figura 7. Para esta região também se observou que a série temporal da umidade do solo derivada pelo LPRM/BR mostra valores mais próximos dos dados observados, os quais são considerados "verdade" terrestre.

As análises estatísticas, apresentadas na Tabela 3, também indicam uma melhoria significativa do LPRM/BR, para os sítios experimentais BA-06 e BA-10 do SMEX03, cujas correlações foram iguais a 0,94 e 0,84, respectivamente. Com relação aos resultados de BIAS e REMQ, também se observou diferenças significativas para o LPRM/BR, apresentando um valor de 0,01 de bias para o sítio BA-06 e REMQ igual a 0 para o sítio BA-11, enquanto que para a versão original do LPRM, o bias foi de até 0,23 para o sítio BA-06. Portanto, as estatísticas apresentadas na Tabela 3 mostram que o LPRM/BR apresenta melhores valores de R, BIAS e REMQ para os diferentes sítios experimentais.

Numa análise comparativa entre diferentes modelos de recuperação da umidade do solo para um determinado sítio na região semiárida da Espanha, Wagner et al. (2007) verificaram que a estimativa da umidade do solo obtida a partir do LPRM apresentou a correlação mais alta com a umidade do solo obtida em campo. Este resultado também corrobora com o potencial do algoritmo de inferência da umidade do solo utilizando micro-ondas passiva.

Por outro lado, considerando a grande extensão territorial do Brasil e a ausência de dados de umidade do solo obtidos "in situ", dados de reanálise do modelo Eta também foram utilizados para comparação com as informações derivadas do LPRM/BR.

A fim de encontrar um resultado mais realista e confiável entre as bases de umidade do solo obtidas pelo LPRM e pela reanálise, os dados incertos em áreas que apresentam vegetação densa (por exemplo, região Amazônica) ou que apresentam erros excessivos (valores baixos e constantes, conforme ilustrado na Fig. 5) foram eliminados, em conformidade com a metodologia aplicada por Rossato et al. (2011). Ou seja, regiões que apresentaram profundidade óptica da vegetação superior a 0,75, eliminou-se o valor de umidade do solo.

Para comparação das bases de dados, a resolução espacial de 0,5° foi estabelecida tanto para as informações derivadas do LPRM quanto para as de

Reanálise do modelo Eta. Desse modo, mapas de correlações entre os diferentes conjuntos de dados de umidade do solo, LPRM e LPRM/BR, com a reanálise de modelo Eta foram gerados, os quais estão ilustrados na Figura 8. Altas correlações indicam as regiões com dados confiáveis, uma vez que os conjuntos de dados são independentes e, assim, a umidade do solo é apresentada com mais acurácia. Os "pixels" em branco representam as áreas mascaradas ou áreas que não possuem nenhuma correlação com a reanálise do modelo Eta. Os dados confiáveis foram definidos como aqueles que mostraram R superior a 0,8, o que é coerente com os valores considerados em outros estudos (por exemplo, os de WAGNER et al., 2007 e de REICHLE et al., 2004). Logo, a correlação entre o modelo ETA e a umidade do solo derivada com o LPRM/BR (Fig. 7b) também mostrou valores mais elevados nas regiões Nordeste, Central e Sul do Brasil, resultado este não observado na Figura 8a, quando se utilizou a primeira versão do LPRM. Portanto, esta análise indica que a atualização do LPRM permite gerar resultados mais satisfatórios. A Fig. 8c apresenta as regiões do LPRM que melhor se correlacionou com LPRM/BR. Através desta, observa-se que algumas regiões do Nordeste e do Sul que não se correlacionaram com o LPRM, ou seja, o LPRM/BR apresentou boa correlação com a umidade do solo obtida pela reanálise do modelo Eta em regiões não verificadas pelo LPRM.

A umidade do solo também é uma variável dependente da precipitação; apesar de não ser diretamente comparável. No entanto, devido à falta de dados observados de umidade do solo, um conjunto de dados de precipitação do CPTEC/INPE também foi utilizado para comparação com os diferentes conjuntos de dados de umidade do solo (reanálise do modelo Eta, LPRM e LPRM/BR), conforme ilustrado na Figura 9. Para a comparação, os dados de umidade do solo foram reamostrados para a mesma resolução espacial (1°x 1°) da base de dados de precipitação do CPTEC/INPE. Os resultados mostraram que, para a precipitação do CPTEC/INPE e a umidade do solo derivada do LPRM (precipitação x LPRM), Fig. 9b, apresenta diversas áreas com correlações superiores a 0,8 nas regiões Centro-Oeste e Nordeste do País. Baseado nesta verificação, Rossato et al. (2011) afirmaram que o algoritmo LPRM possui alto potencial de estimar a variabilidade sazonal da umidade do solo; portanto, a fim de verificar esta afirmativa, com a inclusão das características da superfície terrestre do Brasil, também comparou-se as bases de dados de precipitação e de umidade do solo derivada a partir da versão atualizada do

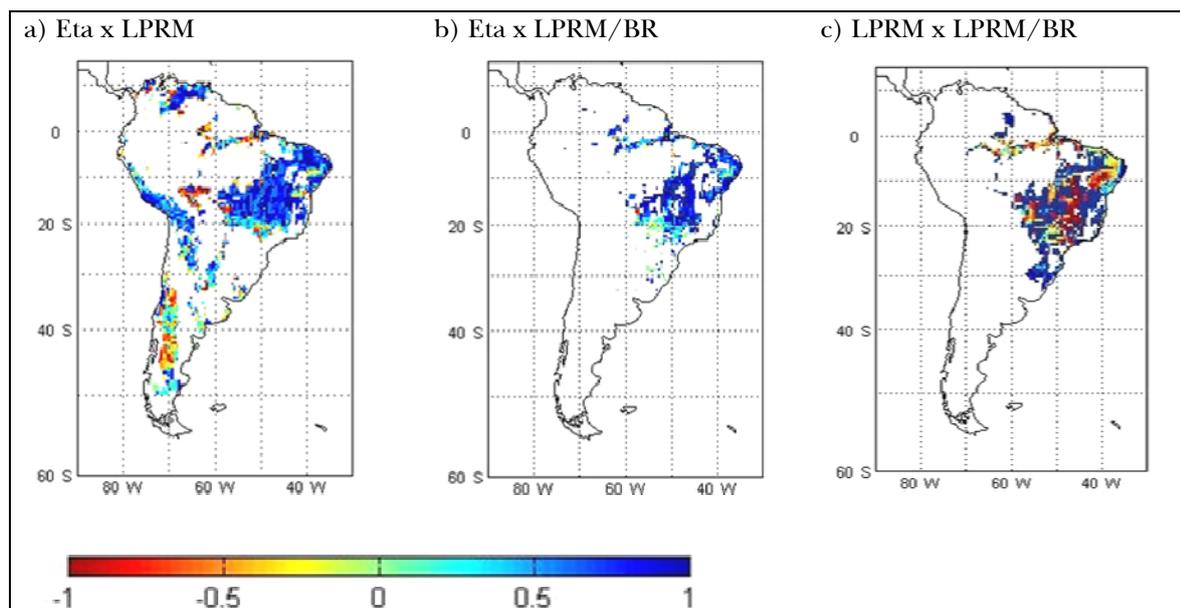


Figura 8 - Mapas de correlação obtidos entre os produtos de umidade do solo durante o ano de 2003: a) reanálise do modelo Eta x LPRM para a América do Sul (Rossato et al., 2011), b) reanálise do modelo Eta x LPRM/BR e c) LPRM x LPRM/BR para o Brasil.

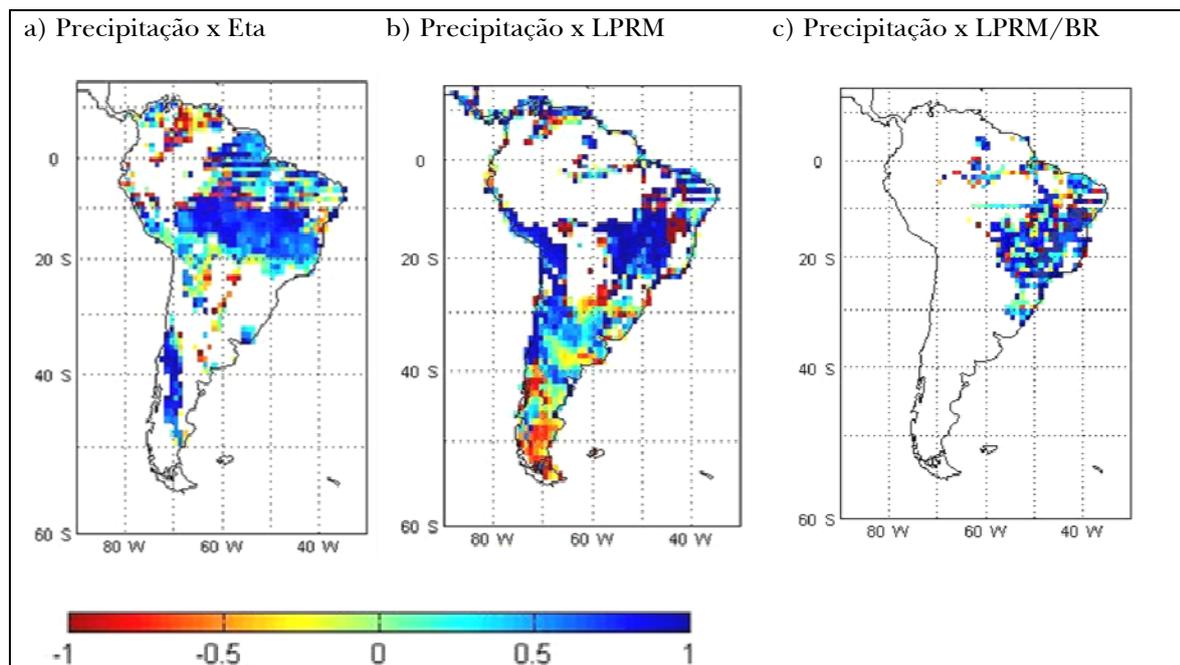


Figura 9 - Mapas de correlação entre a precipitação observada do CPTEC/INPE e os produtos de umidade do solo, durante o ano de 2003, derivados do modelo Eta (a), do algoritmo LPRM sobre a América do Sul (b), ambos apresentados por Rossato et al. (2011), e do LPRM/BR (c) sobre o território brasileiro, utilizando observações do sensor AMSR-E (banda C).

algoritmo. Analisando a Fig. 9c (precipitação x LPRM/BR), observa-se que novas áreas de correlações positivas foram encontradas, tais como nas regiões Sul do Nordeste (10° S e 20° S) quando comparadas com o LPRM. Para a região Sudeste, que compreende os limites 20° S e 30° S, o LPRM/BR também apresentou correlações positivas da mesma forma que o LPRM; porém, nota-se uma variabilidade maior das correlações quando se utiliza o LPRM/BR. Com relação à região Norte, ressaltase que a ausência de informações, tanto no LPRM como no LPRM/BR (Fig. 8b, 9b e 9c), está relacionada à limitação do sensor AMSR-E (banda C) para inferir dados de umidade do solo devido ao alto conteúdo de água da vegetação, conforme já discutido anteriormente. Neste caso, a inferência da umidade do solo derivada pelas duas versões do LPRM somente deverá ser melhorada com a utilização as observações de sensores em banda L (1,9 GHz), como, por exemplo, o sensor MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) a bordo do satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) (KERR et al., 2001).

Contudo, a partir dos resultados obtidos, pode-se observar que a distribuição espacial e temporal da precipitação está mais correlacionada com a umidade do solo derivada do LPRM (tanto a versão original quanto à atualizada), utilizando as observações do AMSR-E, que com a umidade do solo derivada da reanálise Eta. Isto pode ser devido às profundidades das camadas de solo consideradas, ou seja, 10 cm para a reanálise do modelo Eta e aproximadamente 2 cm para o AMSR-E, uma vez que a última responde mais rapidamente à precipitação. Como destacado por Reichle et al. (2004), o momento exato da ocorrência de precipitação é frequentemente incerto nos dados forçantes da atmosfera que alimentam os modelos de superfície terrestre acoplados aos modelos atmosféricos.

Finalmente, comparando as duas versões do algoritmo de inferência da umidade do solo (LPRM e LPRM/BR), verifica-se que, quando comparado com a reanálise do modelo Eta, obtém-se algumas correlações positivas nas áreas não observadas pelo LPRM, como por exemplo, a região Sul do País. Porém, quando a umidade do solo do LPRM foi comparada com a precipitação, observou-se o LPRM/BR apresentou um aumento de correlações positivas para a região 10° - 20° S (Nordeste) e 20° - 30° S (Centro-Oeste) do País. Nas demais regiões, a variabilidade da correlação foi maior quando comparada ao LPRM. Em geral, o LPRM/BR apresentou resultados satisfatórios para a umidade do solo

quando comparado com as diferentes bases de dados de umidade do solo (observacionais e modelo) e de precipitação.

CONCLUSÕES

A fim de verificar as melhorias no algoritmo LPRM a partir da inclusão das características da superfície terrestre, o objetivo do presente estudo foi desenvolver um procedimento desacoplado do LPRM para estimar a temperatura da camada de emissão. Este procedimento, o qual está baseado na metodologia proposta por Owe et al. (2001), foi realizado utilizando dados de temperatura observada do solo (para a profundidade de 5 cm), T_s , e de temperatura de brilho, T_b , em 37 GHz do satélite Aqua sobre o território brasileiro. Assim sendo, uma nova relação linear entre T_s e T_b foi obtida para a determinação da temperatura da camada de emissão no LPRM (Eq. 5).

Além disso, para melhor avaliar o padrão de umidade do solo derivada das informações do sensor em micro-ondas (AMSR-E/Aqua - banda C), dados de propriedades físicas do solo extraídas do Levantamento e Reconhecimento de Solos da EMBRAPA e do Projeto RADAMBRASIL foram incluídos no LPRM.

Portanto, novos resultados de umidade superficial do solo foram obtidos utilizando a nova versão do LPRM (LPRM/BR) e validados com dados observados em dois diferentes sítios brasileiros: SMEX03 e Pé de Gigante. Os resultados indicaram que o LPRM/BR apresentou resultados satisfatórios para a umidade do solo quando comparado com o LPRM, uma vez que este superestimou os valores de umidade do solo. No entanto, deve-se ressaltar que medidas de umidade do solo "in situ" com o nível de precisão e a extensão geográfica necessária para estudos em escala regional são escassas e insuficientes para uma avaliação mais detalhada do desempenho do LPRM/BR.

Por essa razão, dados de umidade do solo do modelo regional Eta e de precipitação observada oriunda do CPTEC/INPE foram utilizados para avaliar o impacto das melhorias da nova versão do algoritmo LPRM (LPRM/BR), o qual foi ajustado para condições de superfície do Brasil. Na comparação com estas duas diferentes base de dados, os resultados do LPRM/BR também mostraram maior acurácia em relação ao LPRM.

Finalmente, este estudo permite concluir que, a partir da inclusão das características da super-

fície terrestre do Brasil no LPRM (ou seja, da inclusão da nova relação linear para a determinação da temperatura de superfície em função da temperatura de brilho em 37 GHz e das propriedades físicas do solo oriundas do Projeto RADAMBRASIL e da EMBRAPA para a determinação da constante dielétrica do solo), a umidade do solo obtida pelo LPRM/BR constitui-se numa importante informação que pode ser aplicada para diferentes fins, tais como monitoramento da umidade do solo em eventos extremos de chuva, contribuindo assim para a emissão de alertas de deslizamento de encostas; apoio no planejamento de atividades de plantio e/ou de irrigação para determinadas culturas e assimilação de dados em modelos de previsão numérica de tempo, o que poderá contribuir na melhoria da previsão do tempo.

Porém, estudos complementares do LPRM/BR devem ser realizados para melhor controlar os padrões sazonais da umidade do solo. Tais estudos incluem a avaliação da umidade do solo por longos períodos e diferentes condições (anos de El Niño/La Niña), bem como a inferência da umidade do solo a partir das novas observações com os sensores em micro-ondas na banda L (como por exemplo, dados do satélite SMOS), principalmente para as regiões densamente vegetadas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo as Pesquisas do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro (Processo 2010/09841-0).

À Dra. Angélica Giarola, integrante da campanha realizada em Barreira (BA), pela concessão dos dados do Experimento de Umidade do Solo (SMEX, 2003).

Ao Dr. Humberto Rocha, pesquisador da Universidade de São Paulo (USP), pela concessão dos dados observados de umidade do solo do sítio Pé de Gigante, localizado em Santa Rita do Passa Quatro, Estado de São Paulo.

REFERENCIAS

ARAUJO, K. D.; RAPOSO, R. W. C.; ANDRADE, A. P.; ROSA, P. R. O.; PAZERA JR., E. Perdas de C-CO₂ do solo correlacionadas a radiação solar e temperatura no semi-árido da Paraíba. *Geografia*, v. 14, n. 2, jul./dez. 2005.

AZEVEDO, T. R.; GALVANI, E. Ajuste do ciclo médio mensal horário da temperatura do solo em função da temperatura do ar. *Rev. Bras. Agrometeorologia*, v. 11, n. 2, p. 123-130, 2003.

BLACK, T.L., 1994. The new NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast examples. *Weather and Forecasting*, 9(2), p. 265-278.

CAMILLO, P. J.; SCHMUGGE, T. J. Estimating soil moisture storage in the root zone from surface measurements, *Soil Sci.*, 135:245-264, 1983.

CHAMPAGNE, C. H.; MCNAIRN AND A.A BERG Monitoring Agricultural Soil Moisture Extremes in Canada Using Passive Microwave Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment. In Press.* doi:10.1016/j.rse.2011.04.030

COHN, S.E., DASILVA, A., GUO, J., SIENKIEWICZ, M., and LAMICH, D., 1998. Assessing the Effects of Data Selection with the DAO Physical-space Statistical Analysis System. *Mon. Wea. Rev.*, 126, pp. 2913-2926.

DE JEU, R. A. M. *Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing.* Thesis. Vrije Universiteit Amsterdam, 2003.

DI BELLO, R. C. *Análise do comportamento da umidade do solo no modelo chuva-vazão SMAP II – versão com suavização hiperbólica.* Estudo de caso: região de Barreiras na Bacia do Rio Grande – BA. 2005. 242f. Tese (Doutorado) - COPPE:UFRJ – Rio de Janeiro, 2005.

DOUVILLE, H. Relevance of soil moisture for seasonal atmospheric predictions: is it an initial value problem? *Climate Dynamics*, v. 22, n.4, p. 429-446, Apr, 2004.

DRUSCH, M. Initializing numerical weather prediction models with satellite-derived surface soil moisture: Data assimilation experiments with ECMWF's Integrated Forecast System and the TMI soil moisture data set. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, D03102, 14 PP., 2007. doi:10.1029/2006JD007478.

ENTEKHABI, D.; NAKAMURA, H.; NJOKU, E.G. Solving the inverse problem for soil moisture and temperature profiles by sequential assimilation of multifrequency remotely sensed observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 32, N.2, p. 438-448, 1994.

- JACKSON, T. J.; SCHMUGGE, T. J.; O'NEILL, P. E. Passive microwave remote sensing of soil moisture from an aircraft platform. *Remote Sens. Environ.*, v.14, p.135-151, 1984.
- KERR YH, WALDTEUFEL P, WIGNERON J-P, MARTINUZZI J-M, FONT J, BERGER M Soil moisture retrieval from space: The Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) mission. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39:1729-1735, 2001
- KUKKONEN, J.; OLSSON, T.; SCHULTZ, D. M. BAKLANOV, A.; KLEIN, T.; MIRANDA, A. I.; MONTEIRO, A.; HIRTL, M.; TARVAINEN, V.; BOY, M.; PEUCH, V. H.; POUPKOU, A.; KIOUTSIUKIS, I.; FINARDI, S.; SOFIEV, M.; SOKHI, R.; LEHTINEN, K. E. J.; KARATZAS, K.; SAN JOSE, R.; ASTITHA, M.; KALLOS, G.; SCHAAP, M.; REIMER, E.; JAKOBS, H.; EBEN, K. A review of operational, regional-scale, chemical weather forecasting models in Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 12, p.1-87, 2012.
- MEESTERS, A. C. G. A., DE JEU, R. A. M., and OWE, M., 2005. Analytical derivation of the vegetation optical depth from the microwave polarization difference index. *IEEE Geosc. Rem. Sens. Let.*, v. 2, n.2, pp. 121-123.
- MESINGER, F., Z. I. JANJIC, S. NICKOVIC, D. GAVRILOV, E D. G. DEAVEN,: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, v. 116, p.1493-1518, 1988.
- MO, T., CHOUDHURY, B. J., SCHMUGGE, T. J., AND JACKSON, T. J .A model for microwave emission from vegetation-covered. *Journal of Hydrology*, v. 184, p.101-129, 1982.
- NJOKU, E. G.; ENTEKHABI, D. Passive microwave remote sensing of the soil moisture. *Journal of Hydrology*, v.184, p.101-129, 1996.
- NJOKU, E. G.; KONG, J. A. Theory for passive microwave remote sensing of near surface soil moisture. *J. Geophys. Res.*, v. 82, n.20, p.3108-3118, 1977.
- NJOKU, E. G.; O'NEILL, P. E. Multifrequency microwave radiometer measurements of soil moisture. *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE. v. 20, p.468-475, 1982.
- OLIVER, M A., WEBSTER, R. Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* v. 4, no. 3, p. 313-332. 1990.
- OWE, M.; DE JEU, R; WALKER, J. P. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 8, p 1643-1654, 2001.
- OWE, M.; VAN DE GRIEND, A. A.; DE JEU, R. A. M.; DE VRIES, J. J.; SEYHAN, E.; ENGMAN, E. T. Estimating soil moisture from satellite microwave observations: Past and ongoing projects, and relevance to GCIP. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, p.19735-19742, 1999.
- OWE M., DE JEU, R. A. M., and HOLMES, T. R. H., 2008. Multi-Sensor Historical Climatology of Satellite-Derived Global Land Surface Moisture. *Journal of Geophysical Research*, 113,F01002, doi:10.1029/2007JF000769.
- PIELKE, R.A. Mesoscale meteorological modeling. 2nd Edition, Academic Press, San Diego, CA, 2002.
- REICHLER, R. H.; KOSTER, R. D.; DONG, J.; BERG A. A. Global Soil Moisture from Satellite Observations, Land Surface Models, and Ground Data: Implications for Data Assimilation, *Journal of Hydrometeorology*, v.5, n.3, p. 430-442, 2004.
- ROCHA, H. R. ; FREITAS, H. C. ; DIAS, M. A. F. S. ; LIGO, M. A. ; CABRAL, O. M. R. ; TANNUS, R. N. ; ROSOLEM, R. . Measurements of CO2 exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brasil. *Biota Neotropica* (English ed.), Campinas, SP, v. 2, n. 1, 2002.
- ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.19, n.2, 113-122, 2004.
- ROSSATO, L. *Estimativa da umidade superficial do solo a partir de sensoriamento remoto por micro-ondas passiva sobre a América do Sul*. . 177p. (INPE-16657-TDI/1615). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2010. Disponível em: <<http://sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/11.24.18.03>>.

ROSSATO, L.; DE JEU, R.; ALVALÁ, R. C. S.; SOUZA, S. Evaluation of soil moisture from satellite observations over South America. *International Journal of Remote Sensing*, in press, 2011.

SCHMUGGE T. J.; GLOERSEN, P.; WILHEIT, T. T. GEIGER F. Remote sensing of soil moisture with microwave radiometers. *J Geophys Res.* 1974;79 (2):317–23.

SCHMUGGE, T. J. Effect of texture on microwave emission from soil. *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-18, 353-361, 1980.

SCHNEEBERGER, K.; SCHWANK, M.; STAMM, C.; ROSNAY, P.; MÄTZLER, C.; FLÜHLER, H. Topsoil structure influencing soil water retrieval by microwave radiometry. *Vadose Zone Journal*, v. 3, p.1169-1179, 2004.

VAN DE GRIEND, A. A. AND OWE, M. Microwave vegetation optical depth and inverse modelling of soil emissivity using Nimbus/SMMR satellite observations. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 54:225–239, 1994.

WAGNER, W., NAEIMI, V., SCIPAL, K., DE JEU, R. A. M., and MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. Soil moisture from Operational Meteorological Satellites, *Hydrogeology Journal*, v. 15, n.1, p. 121-131.

WANG, J. R.; SCHMUGGE, T. J.; MCMURTREY, J. E.; GOULD, W. I; GLAZAR, W. S.; FUCHS. A multifrequency radiometric measurement of soil moisture content over bare and vegetate fields. *Geophy. Res. Lett.*, v.9, p.4, p. 416-419, 1982.

WANG, J. R.; SCHMUGGE. T. J. An empirical model for the complex dielectric permittivity of soil as a function of water content. *IEEE. Trans. Geosci. Remote Sensing*, GE-18, p.288-295, 1980.

WIGNERON, J. P.; CALVET, J. C.; PELLARIN, T.; VAN DE GRIEND, A.; BERGER, M.; FERRAZZOLI, P. Retrieving near surface soil moisture from microwave radiometric observations: Current status and future plans, *Remote Sens. Environ.*, v. 85, p. 489–506, 2003.

ZHANG H.; FREDERIKSEN, C. S. Local and non-local impacts of soil moisture initialization on AGCM seasonal forecasts: A model sensitivity study. *J. Climate*, v.16, n.13, 2117-2137, 2003.

Impact Of Land Surface Characteristics On The Soil Moisture Inference Algorithm In Brazil, Using Observations Of The AMSR-E/Aqua Sensor

ABSTRACT

Studies must be performed using the LPRM (Land Parameter Retrieval Model) algorithm to estimate the surface moisture of soil throughout the South American continent in order to improve control of seasonal patterns of soil moisture in different regions of South America, since the model was developed for specific North American conditions. Thus, the purpose of this study was to improve the LPRM algorithm and the results of Rossato et al. (2011), considering the land surface characteristic of Brazil and using temperature data from the surface measured in situ and estimated by satellite (at the frequency of 37 GHz). Data on the physical properties of the soil extracted from the Survey and Reconnaissance of Soils in Brazil were used to determine the dielectric constant of the soil which is the function of soil moisture. Statistical analyses, such as correlation coefficient, bias and mean quadratic error (REMQ) were used to validate the surface temperature and soil moisture derived by the new version of the algorithm adjusted for the surface conditions of the Brazilian territory (LPRM/BR), obtained from the information about the sensor AMSR-E/Aqua (6.9 GHz - band C). The results indicated a significant improvement of the LPRM/BR for experimental sites BA-06 and BA-10 of SMEX03, whose correlations were equal to 0.94 and 0.84, respectively. As to the results of BIAS and REMQ, for the original version of LPRM, the bias was up to 0.23 for site BA-06. However, for LPRM/BR significant differences were observed, presenting a value of 0.01 of bias for site BA-06 and REMQ equal to 0 for site BA-11. Due to the absence of data on soil moisture measured “in situ”, data on re-analysis of soil moisture (from the ETA model) and of precipitation were also utilized in the evaluation of LPRM/BR. Thus, the underestimation of the surface temperature and the overestimation of the soil moisture presented by LPRM were solved using LPRM/BR. Besides, a increase in the areas with high correlations was also observed ($r > 0.8$) obtained between LPRM/BR and the different databases (model Eta and precipitation observed by CPTEC/INPE). It was thus concluded that the LPRM/BR allows estimating soil moisture from the observations in microwaves of sensor AMSR-# (band C0, with greater accuracy than the original version of the algorithm.

Keywords: LPRM/BR; soil moisture.