

UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

CEPSRM – CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E
METEOROLOGIA

PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

**Estudo da viabilidade do uso de dados do sensor AMSR-E
para detecção da umidade do solo.**

JOAO MANUEL TRINDADE SILVA

PORTO ALEGRE 2011

**Estudo da viabilidade do uso de dados do sensor AMSR-E para
detecção da umidade do solo.**

Geógrafo JOAO MANUEL TRINDADE SILVA

PORTO ALEGRE 2011

ORIENTADORA: Prof^ª. Dra. Denise Cybis Fontana

COMISSÃO EXAMINADORA:

Dra. Bernadete Radin

Prof. Dr. Carlos Gustavo Tornquist

Prof. Dr. Jorge Arigony

**Dissertação de mestrado apresentada
como requisito para obtenção do
Título de Mestre em Sensoriamento
Remoto**

Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora, aos professores do mestrado de sensoriamento remoto e aos professores convidados da banca pela disposição em contribuir com este trabalho. Também sou grato ao doutor Richard Jeu e a todos os pesquisadores em microondas que contribuíram de uma forma ou de outra com o trabalho, assim como também à minha esposa Rossana que teve a paciência e a compreensão de me ajudar na construção deste.

RESUMO

Informações sobre a umidade do solo são fundamentais para monitorar as condições hídricas da superfície e prever secas e estiagens. Para efetuar este monitoramento com métodos de detecção direta em grandes áreas, o custo é alto e demorado. As possibilidades que se abrem com o uso dos sensores a bordo de satélites que são sensíveis à energia de microondas são grandes, pois a técnica permite detecção de umidade do solo, de temperatura do solo e de quantidade de cobertura de vegetação para grandes áreas da superfície terrestre. O presente trabalho pretendeu colaborar para avaliação do potencial do sensor de microondas AMSR-E na detecção da umidade do solo. Para isso, foram utilizados dados de umidade do solo coletados pelo sensor AMSR-E, a bordo do satélite AQUA do programa NOAA, em 2009 para uma área do sul do Brasil, no Estado do Rio Grande do Sul, e feita a comparação com dados de precipitação pluvial medida em estações pluviométricas de superfície. Os resultados mostraram que existe relação entre umidade do solo detectada pelo sensor e a precipitação pluvial ocorrida. Nos meses avaliados verificou-se que os padrões de resposta do sensor à umidade do solo corresponderam em grande medida aos padrões de precipitação pluvial, o que na prática nos possibilita relacionar um evento a outro. Houve semelhança de padrões espaciais de umidade do solo com os padrões de molhamento do solo por parte da precipitação pluvial. As comparações realizadas entre os padrões permitem afirmar que o sensor AMSR-E pode servir ao monitoramento de secas e estiagens de maneira geral para um território, uma vez que consegue perceber a evolução da umidade do solo espacialmente e temporalmente para grandes áreas.

ABSTRACT

Information on soil moisture is critical to monitor the surface water conditions and predict droughts and dry spells. To perform this monitoring with traditional methods the cost is high and time consuming. The possibilities opened by the use of sensors aboard satellites that are sensitive to microwave energy are high, because the technique allows detection of soil moisture, soil temperature and amount of vegetation cover for large surface areas land. This study sought to contribute to assessing the potential of microwave sensor AMSR-E soil in detection. For this we used data collected by the soil moisture sensor AMSR-E aboard the AQUA satellite NOAA program in 2009 to an area of southern Brazil, in Rio Grande do Sul, and made a comparison with data rainfall measured in surface rainfall stations. The results showed that there is a relation between the sensors detects soil moisture and the phenomenon of rainfall occurred over the same territory. In the availed months it was found that the response patterns of soil moisture sensor to correspond largely to rainfall patterns, which in practice allows us to relate one event to another. There was similarity of spatial patterns of soil moisture with the patterns of soil wetting by rainfall. The comparisons between the patterns to indicate that the AMSR-E sensor can be used to monitor droughts and dry spells in general to a territory once can detect the evolution of soil moisture and period for large areas.

SUMÁRIO

	Pag.
LISTA DE FIGURAS.....	06
LISTA DE TABELAS.....	09
1. Introdução.....	10
2. Revisão Bibliográfica.....	13
2.1.Umidade do solo.....	13
2.2.Comportamento Espectral dos solos.....	14
2.3.Interferências da superfície terrestre em relação ao sinal de microondas.....	18
2.4.Os sensores passivos para microondas.....	22
3. Material e Métodos.....	36
3.1.A área de estudo.....	36
3.2.Definição dos períodos de molhamento e ressecamento do solo.....	44
3.3.Imagens do sensor AMSR-E.....	48
3.4.Relações entre a precipitação pluvial e a umidade do solo.....	50
4. Resultados e Discussão.....	53
4.1.Períodos secos e úmidos.....	53
4.2.Padrão temporal da precipitação pluvial e da umidade do solo.....	56
4.3.Distribuição espacial da precipitação pluvial e a umidade do solo.....	75
4.4.Considerações finais.....	102
5. Conclusões.....	105
6. Recomendações.....	107
7. Bibliografia.....	108

LISTA DE FIGURAS

Figura .01- Comparação das constantes dielétricas para solos arenosos, siltosos e argilosos, as quais foram obtidas a partir do modelo de Wang-Schmugge. Fonte: De Jeu (2003).....	pag 17
Figura 02 – Espectro eletromagnético – Fonte: Ulaby et al., 1986.....	pag 23
Figura 03 – Esquema simplificado do modelo de recuperação de informação do sensor AMSR-E. Fonte: DE JEU, 2009.....	pag 25
Figura 04 – Diagrama de referência em relação à Tb. Fonte: NASA, 2011.....	pag 28
Figura 05 – Estrutura do Produto utilizado L3.2. Fonte: Manual de uso dos produtos do sensor AMSR-E, NASA.....	pag 34
Figura 06 – Mapa do Estado do Rio Grande do Sul salientada a área de estudo – Fonte: DRH, 2011.....	pag 37
Figura 07 – Mapa de relevo do Rio Grande do Sul – Fonte: SEPLAG).....	pag 37
Figura 08 – Mapa de solos da área de estudo – (Fonte: IBGE/Embrapa, 2001).....	pag 40
Figura 09 – Mapa de precipitação anual do RS. Fonte: SEPLAG,2010.....	pag 41
Figura 10 - Distribuição da precipitação mensal para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho de 2009 no RS. Fonte: FEPAGRO.....	pag 42
Figura 11 – Distribuição da precipitação mensal para os meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2009 no RS. Fonte: Fepagro.....	pag 43
Figura 12 – Localização das estações pluviométricas utilizadas. Fonte: ANA (2011).....	pag 45
Figura 13 – Distribuição da precipitação ao longo do mês de abril de 2009, nas estações pluviométricas avaliadas. Fonte ANA.....	pag 54
Figura 14 – Distribuição da precipitação ao longo do mês de novembro de 2009, nas estações pluviométricas avaliadas. Fonte ANA.....	pag 55
Figura 15 –Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.....	pag 56
Figura 16 – Relação dos dados de umidade do solo observada sobre as de estações Jacaqua e Jaguari.....	pag 64
Figura 17 – Relação dos dados de umidade do solo observada sobre as de estações de Bossoroca e Fazenda Santa Cecília.....	pag 64
Figura 18 - Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de novembro nas estações pluviométricas analisadas.....	pag 65
Figura 19 – Relação entre a umidade do solo de estações próximas entre si e similares nos padrões de precipitação.....	pag 73
Figura 20 – Distribuição espacial da precipitação pluvial acumulada para o mês de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA(2011).....	pag 75

Figura 21 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 04 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA(2011).....	pag 76
Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 05 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 77
Figura 23 – Mapa de umidade do solo para o dia 01 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 78
Figura 24 – Mapa de umidade do solo para o dia 02 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 78
Figura 25 – Mapa de umidade do solo para o dia 03 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 79
Figura 26 – Mapa de umidade do solo para o dia 04 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 79
Figura 27 – Mapa de umidade do solo para o dia 06 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 80
Figura 28 – Mapa de umidade do solo para o dia 07 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 80
Figura 29 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 19 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 81
Figura 30 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 20 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 82
Figura 31 – Mapa de umidade do solo para o dia 17 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 83
Figura 32 – Mapa de umidade do solo para o dia 18 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 83
Figura 33 – Mapa de umidade do solo para o dia 20 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 84
Figura 34 – Mapa de umidade do solo para o dia 22 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 84
Figura 35 – Mapa de umidade do solo para o dia 23 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 85
Figura 36 – Distribuição espacial da precipitação pluvial acumulada para o mês de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 86
Figura 37 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 03 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 87
Figura 38 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 04 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 88
Figura 39 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 10 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 88

Figura 40 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 11 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 89
Figura 41 – Mapa de umidade do solo para o dia 01 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 90
Figura 42 – Mapa de umidade do solo para o dia 02 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 90
Figura 43 – Mapa de umidade do solo para o dia 03 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 91
Figura 44 – Mapa de umidade do solo para o dia 04 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 92
Figura 45 – Mapa de umidade do solo para o dia 05 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 92
Figura 46 – Mapa de umidade do solo para o dia 07 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 93
Figura 47 – Mapa de umidade do solo para o dia 08 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 93
Figura 48 – Mapa de umidade do solo para o dia 09 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 94
Figura 49 – Mapa de umidade do solo para o dia 10 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 94
Figura 50 – Mapa de umidade do solo para o dia 11 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 95
Figura 51 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 22 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 96
Figura 52 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 24 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 96
Figura 53 – Mapa de umidade do solo para o dia 27 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 97
Figura 54 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 28 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 98
Figura 55 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 29 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 98
Figura 56 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 30 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011).....	pag 99
Figura 57 – Mapa de umidade do solo para o dia 28 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 99
Figura 58 – Mapa de umidade do solo para o dia 30 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.....	pag 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Dados comparativos entre sensores de microondas. Fonte: NASA, 2011.....	pag 26
Tabela 02 - Frequências e resoluções do sensor AMSR-E. Fonte: NASA, 2011.....	pag 29
Tabela 03- Produtos disponibilizados pela NASA resultantes do sensor AMSR-E:	pag 31
Tabela 04 – Produtos utilizados para gerar o produto L3.2. Fonte: Adaptado de JAXA, 2011.....	pag. 35
Tabela 05 - Coordenadas geográficas das estações pluviométricas da área de estudo.....	pag 44
Tabela 06 - Dados de precipitação pluvial de Abril. Fonte: ANA, 2010.....	pag 46
Tabela 07 - Dados de precipitação pluvial de Novembro. Fonte: ANA, 2010.....	pag 47
Tabela 08 - Disponibilidade de dados de umidade do solo para a área estudada.....	pag 50
Tabela 09 - Correlação entre as umidades do solo nas estações que possuíam padrões de precipitação similares.....	pag 63
Tabela 10 – Correlação entre os dados de precipitação pluvial e umidade do solo coletados simultaneamente, em novembro de 2009.....	pag 70
Tabela 11 – Correlação entre os dados de precipitação pluvial e umidade do solo com defasagem de 1 dia, em novembro de 2009.....	pag 70
Tabela 12 – Estatísticas do número de eventos de precipitação que causou variações positivas na umidade do solo, em novembro de 2009.....	pag 71
Tabela 13 - Coeficiente de correlação entre a umidade do solo em estações pluviométricas com padrões de precipitação pluvial similares no mês de novembro.....	pag 72

1. Introdução

A estiagem é um fenômeno hidrológico que pode ser definido como uma significativa diminuição da conjuntura dos recursos hídricos durante um período suficientemente prolongado, afetando uma área extensiva com consequências socioeconômicas, segundo conceito da defesa civil. Pode ser considerado como um fenômeno climático normal e recorrente, apesar de ser comum considerar como um fenômeno anômalo. A estiagem acontece de diferentes maneiras e com diferentes características, de acordo com a região do planeta. Pode ser caracterizada por um longo período de deficiência hídrica, causada principalmente pela redução da precipitação pluvial, apesar de existirem outras fontes de recursos hídricos, como a água subterrânea. As estiagens resultam também do atraso dos períodos chuvosos ou da ausência de chuvas previstas para uma determinada temporada, sendo menos intensas e de menor duração que as secas. Segundo o glossário da defesa civil, a seca é uma estiagem prolongada, ou seja, que dura mais de um mês, período considerado normal para a maioria das regiões do globo (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 1998).

O Rio Grande do Sul, por estar situado na região subtropical do Globo, apresenta características climáticas diferenciadas em relação ao restante do País, dada a grande instabilidade atmosférica, uma vez que se constitui em região de encontros de massas de ar. Assim, eventos meteorológicos extremos são comuns no Estado, com estiagem em determinadas épocas do ano e de alta pluviosidade, acompanhada de enchentes, em outras épocas do ano.

A estiagem caracteriza-se como um problema principalmente à agricultura, ao abastecimento público e aos principais usuários de água. A crescente escassez de água e os conflitos de uso daí decorrentes acirram os efeitos da estiagem e geram a necessidade de serem estabelecidos mecanismos para o seu gerenciamento.

Para gerenciar as bacias hidrográficas é necessário conhecer os aspectos físicos, pois o cálculo da água disponível na bacia deve levar em conta a permeabilidade do solo, a água que escorre superficialmente e a água que permanece acumulada. Dentro desse enfoque é importante detectar as capacidades e as características físicas das várias regiões do Rio Grande do Sul em relação aos solos e à água, visto que atualmente se colocam temas polêmicos em relação ao uso do solo e à condição que alguns tipos de uso dos solos têm de provocar o secamento do solo.

Nas situações de estiagem, o Estado requer conhecimento sobre as condições de umidade, de pluviosidade, além de planos de ação para prevenir os efeitos dessas estiagens. De acordo com o Centro Nacional de Mitigação de Secas dos EUA (*National Drought Mitigation Center*) da Universidade de Nebraska, os componentes básicos de um plano contra a seca são: monitoramento, avaliação de riscos e mitigação.

Para fins de monitoramento de secas ou estiagens é importante obter informações da umidade e da temperatura do solo. A determinação da umidade do solo, utilizando métodos diretos (detectores de umidade no solo) ou indiretos (através dos

cálculos de balanços hídricos), demanda tempo e trabalho. Além disso, há uma necessidade de instrumentos para o estudo da determinação do balanço hídrico, independente da escala geográfica em uso. Conseqüentemente, esses métodos tornam-se inviáveis sobre extensas áreas. Logo, a falta de disponibilidade de dados de umidade do solo para grandes áreas, 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.

Os métodos atualmente disponíveis de sensoriamento remoto, para monitorar essas duas variáveis, são de fundamental importância, tanto em escala global como regional, dada a possibilidade de estender as observações esparsas de umidade do solo coletadas em estações terrestres para uma cobertura espacial mais ampla. Enquanto observações nas regiões do infravermelho e do visível do espectro eletromagnético são adequadas para detectar e mapear superfícies úmidas dos solos, sensores de microondas são as ferramentas mais promissoras para obter estimativas quantitativas deste parâmetro, inclusive sobre superfícies vegetadas.

A emissão de microondas passivas da superfície terrestre é fortemente influenciada pela umidade da superfície do solo e pela natureza da vegetação sobrejacente. Neste caso, o conhecimento da profundidade óptica, o parâmetro que quantifica o efeito da vegetação sobre a emissão de microondas, é necessário para a recuperação de valores precisos de umidade do solo.

Um dos instrumentos utilizados pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), o programa americano para monitoramento climático, para o tempo e aplicações de previsão de clima, é o sensor japonês *Advanced Microwave Scanning Radiometer E* (AMSR-E), lançado no satélite Aqua da NASA.

Assim, torna-se fundamental conhecer o potencial do sensor AMSR-E para o monitoramento da umidade do solo nos diferentes ambientes terrestres da Terra. Alguns estudos já foram realizados no sentido de avaliar o uso desse sensor para áreas no Japão, nos EUA e em áreas da Europa. No Brasil, algumas experiências foram realizadas (ROSSATO, 2010), mas, todavia o território nacional carece de pesquisa nesse sentido. O Rio Grande do Sul possui um território com características interessantes para estudar o potencial do sensor AMSR-E, uma vez que possui amplas áreas desprovidas de vegetação de maior porte (campos) e áreas de relevo menos acidentado (oeste do Estado).

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a possibilidade de uso das informações fornecidas pelo sensor AMSR-E para fins de monitoramento da umidade do solo. Os objetivos específicos se constituíram em comparar o padrão temporal e a distribuição espacial da precipitação pluvial e da umidade do solo.

Deve-se ressaltar que o potencial das técnicas de sensoriamento remoto para a estimativa da umidade do solo é válido apenas para a camada superficial (~10 cm de solo). Salienta-se também que o presente trabalho não pretende validar os dados do

sensor AMSR-E para toda a superfície do estado do Rio Grande do Sul. Ao contrário, pretende-se iniciar com o estudo deste tipo de sensor para entender melhor a umidade do solo e outros índices relacionados a este, uma vez que existe uma ampla variedade de dados e uma ampla variedade de sensores que detectam as características físicas dos solos superficiais, como umidade, temperatura, cobertura vegetal, etc...

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Umidade do solo

A umidade no solo constitui-se numa das variáveis mais importantes nos processos de troca entre o solo e a atmosfera, bem como para estudos de infiltração, de drenagem, de condutividade hidráulica e de irrigação, entre outros. Além disso, é uma variável indispensável para o entendimento de muitos processos hidrológicos que estão envolvidos em uma grande variedade de processos naturais (geomorfológicos, climáticos, ecológicos, etc.) que atuam em diferentes escalas espacial e temporal, conforme Entin et al. (2000).

Considerando o ciclo hidrológico, a água chega ao solo através da precipitação pluvial, infiltra, preenche a capacidade de armazenamento no solo, é conduzida pelo solo para camadas mais profundas e alimenta os lençóis freáticos e aquíferos. A fração que não penetra no solo, escoia alimentando diretamente lagos, rios e oceano. A fração armazenada é em parte disponível para as plantas, sendo absorvida e transpirada simultaneamente, além de evaporar diretamente do solo para a atmosfera.

A água na forma líquida apresenta propriedades que condicionam seu comportamento no solo. A polaridade, pontes de hidrogênio e tensão superficial da água fazem com que a água em sistemas porosos atinja estado de menor energia livre e seja retida contra a gravidade, especialmente por capilaridade e também por adsorção. De acordo com o conteúdo e tipo de retenção podem-se considerar três tipos de estados de umidade do solo, segundo Lepsch (2010): solo molhado, solo úmido e solo seco. No solo molhado a água preenche todos os poros e o ar está praticamente ausente, no solo úmido a água infiltra-se por entre os poros e o ar começa a ocupar os macro poros (maiores que 0,05 mm de diâmetro), deixando a água somente nos micro poros. Estes por sua vez funcionam como vasos capilares e conseguem reter por mais tempo o líquido presente neles, mesmo contra a ação da gravidade. Quanto menor o poro mais energia é necessária para retirar a água deste. Quando o solo seca, os poros vão se esvaziando e películas de água recobrem as partículas sólidas, fazendo com que o processo de adsorção domine a retenção de água. A estrutura do solo determina assim como será a retenção de água neste, pois determina o arranjo das partículas que vai determinar a distribuição dos poros. A adsorção pode ser elétrica, tornando a atração da água sobre os sólidos.

Além da textura do material, a qualidade do solo é importante para definir a capacidade de retenção da água. Solos arenosos têm menor capacidade de armazenar água do que solos argilosos ou ricos em matéria orgânica. Já os solos secos possuem uma quantidade mínima de água que não consegue circular por causa da força com que ela é retida ao redor das partículas coloidais dos solos. Existem argilas que têm propriedades de retenção de água de acordo com a composição de cristais, outras que não possuem presença de cristais e, portanto, retêm muito pouca água. A matéria orgânica também possui boa capacidade de retenção da água (REICHARD, 1990).

Solos com diferentes composições texturais apresentam diferentes relações entre conteúdo de umidade e as respectivas constantes dielétricas. Solos com alto conteúdo de argila têm uma constante dielétrica menor do que o solo arenoso para o mesmo conteúdo de umidade (DE JEU, 2003).

A equação fundamental da capilaridade estabelece que a força de retenção da água seja inversamente proporcional ao diâmetro do capilar, multiplicado por uma constante derivada das condições locais (gravidade local, temperatura). Se considerarmos o sistema poroso do solo como um sistema capilar e com determinada área superficial, entenderemos que a água é retida no solo devido aos dois mecanismos: capilaridade e adsorção. A força capilar explica a ascensão da água em vasos ou no campo, de baixo para cima contra a gravidade e lateralmente quando a água é adicionada num ponto e aumenta à medida que o tamanho de poro diminui. À medida que o solo seca diminui o volume de água retido até que a lâmina de água fica restrita à superfície das partículas, retida por efeito eletrostático ou por adesão. Nestes dois processos de retenção, o maior volume de água é retido por efeito capilar e o volume menor e fortemente retido no solo é retido por adsorção (REINERT, 2011).

A textura e a estrutura do solo que definem a área superficial e a arquitetura do sistema poroso são os principais fatores associados ao armazenamento e disponibilidade da água nos solos, assim como, com a habilidade dos solos em conduzir água nas camadas profundas do perfil do solo.

A quantidade de água retida por unidade de massa de sólido é definida como umidade gravimétrica (U_g) e por unidade de volume do solo é definida como umidade volumétrica (U_v ou θ). Ambas podem ser expressas em termos unitários ou percentuais. A medida da umidade é importante e de fácil execução, porém para a medição da U_v necessita-se coletar amostra com volume conhecido e estrutura preservada. Assim como a precipitação pluvial, a quantidade de água armazenada em um solo é comumente apresentada em termos de lâmina de água retida (REINERT, 2011).

A determinação da umidade do solo, utilizando métodos diretos ou indiretos, demanda tempo e trabalho. Além disso, há necessidade de consideráveis instrumentos envolvidos no estudo da determinação do balanço hídrico, independente da escala geográfica em uso, conforme Villagra et al. (1995). Consequentemente, esses métodos tornam-se inviáveis sobre extensas áreas, como é o caso do Brasil. Logo, a falta de disponibilidade de dados de umidade do solo para o território brasileiro, com o nível de precisão e a extensão geográfica necessários para estudos em escala regional, limita o entendimento da interação entre a umidade do solo e a atmosfera.

2.2. Comportamento Espectral dos solos

Os solos têm comportamentos específicos em relação à reflexão e refração da energia eletromagnética que chega à superfície terrestre, assim como a água também. As curvas espectrais dos solos sem vegetação apresentam, no intervalo espectral da banda do azul, valores de reflexão baixos, os quais aumentam continuamente em direção da

banda vermelha, do infravermelho próximo e do médio (JENSEN, 2009). Por isso, as características de solos puros podem ser analisadas nestas bandas.

Os parâmetros constantes, como tipo de mineral, granulação e conteúdo de material orgânico, assim como os parâmetros variáveis, como umidade do solo e rugosidade de superfície, influenciam a resposta espectral. Deve-se ressaltar a existência de elevada correlação entre os parâmetros constantes e as variáveis (JENSEN, 2009).

Segundo JENSEN (2009), a alta umidade do solo é caracterizada, em todos os comprimentos de onda, por valores baixos de reflexão, pois o índice de refração nas áreas frontais da interface água/partícula é menor do que o índice de refração nessas áreas em solos secos. Enquanto na faixa do espectro ótico a interação ocorre no nível da ressonância molecular na superfície de contato, em micro-ondas a resposta é condicionada à geometria e às profundidades das grandezas dielétricas da superfície. A extensão da penetração depende da umidade, da densidade da vegetação, bem como do comprimento de onda. Assim comprimentos de onda menores interagem com as camadas superficiais da vegetação e os comprimentos de onda mais longos com as camadas inferiores da vegetação, podendo em alguns casos, até mesmo interagir com o solo ou mesmo com o subsolo.

O parâmetro fundamental medido por sensores de microondas passivos é a temperatura de brilho (T_b), que mede a emissão de microondas térmica. Este parâmetro é fortemente influenciado pelas propriedades dielétricas dos meios de comunicação observados, que são caracterizados pela constante dielétrica complexa ou permissividade. A temperatura de brilho de uma superfície é igual à emissividade (e) multiplicada pela temperatura física (T) (JACKSON, 1995).

Com base no que foi citado acima, a equação para T_b é:

$$eT + [1 - e] T_{céu} \quad (1)$$

Onde eT é a temperatura física do solo, e é emissividade e $T_{céu}$ é a temperatura oriunda do espaço.

A constante dielétrica (ϵ) é uma medida da resposta do solo a uma onda eletromagnética. Esta resposta é um número complexo, contendo uma parte real ($\hat{\mu}$) e uma parte ($\hat{\mu}$) imaginária que determinam a velocidade da onda e as perdas de energia no meio, respectivamente. A raiz quadrada de ϵ determina o índice de refração para o solo (De Jeu, 2004).

A base para que as microondas sejam sensíveis à umidade do solo decorre do grande contraste na constante dielétrica do solo seco ($\epsilon \approx 4$) e água ($\epsilon \approx 80$) e da consequente propriedade dielétrica do solo, a água misturada ao solo ($\epsilon \approx 4-40$) e seu efeito sobre a emissão natural de microondas a partir do solo. (SCHMUGGE et al., 1990). A constante dielétrica é uma propriedade elétrica da matéria e é uma medida da resposta de um meio para um campo elétrico aplicado. A parte real determina a

propagação das microondas característica da energia que passa através do solo, enquanto a parte imaginária determina as perdas de energia. A constante dielétrica é uma propriedade elétrica da matéria e é uma medida da resposta do meio para um campo elétrico aplicado (OWE, M. and Van de Griend, 1998).

A constante dielétrica da maioria dos meios dielétricos de comunicação natural é entre 1 e 6 e aumenta até 80 de água líquida livre (DE JEU, 2003). Esta é a razão para a alta sensibilidade das microondas para a umidade contida nos corpos observados. A cada vez que é adicionada água ao solo seco, esta fica fortemente ligada à superfície das partículas, o que causa apenas um pequeno aumento de ϵ no solo. À medida que mais água é adicionada, acima de um valor de umidade de transição (W_t), a ϵ do solo aumenta rapidamente porque as moléculas adicionais estão longe da superfície das partículas do solo e livres para girar (SCHMUGGE et al., 1990). Isso explica os efeitos da textura do solo em que a superfície depende do tamanho da partícula ou textura; solos argilosos, de fato, com maior área de superfície por volume, mantêm as moléculas de água mais fortemente ligadas do que solos arenosos.

Em meio não homogêneo, como o solo, a constante dielétrica complexa é uma combinação das constantes dielétricas individuais de seus componentes (ou seja, ar, água, rocha, etc.). No solo a constante dielétrica é determinada em grande parte pelo conteúdo de umidade, salinidade, temperatura, composição textural e frequência (OWE, M. and Van de Griend, 2001). Os solos são sistemas heterogêneos contendo partículas sólidas, ligando água livre, ar, sais, e outros e sua permissividade que depende de seus constituintes, não é uma média ponderada. 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 relação entre a constante dielétrica do solo e o teor de umidade é quase linear, exceto para teores de umidade baixos (Figura 01). Esta não linearidade nos teores de umidade baixa é devido a fortes laços que se desenvolvem entre as superfícies das partículas do solo e os filmes finos de água que os cercam. Estas ligações são tão fortes em níveis de baixa umidade, que a rotação livre das moléculas de água é impedida. Esta água é muitas vezes referida como água ligada. Portanto, em um solo relativamente seco, a água está fortemente ligada e contribui pouco para a constante dielétrica da mistura de água no solo (DE JEU, 2003).

Muitos modelos empíricos e teóricos têm sido sugeridos para relacionar a constante dielétrica da mistura ao de seus constituintes, mas a relação exata ainda não é bem compreendida. Uma extensa investigação, que abrange laboratórios de medições, bem como modelos empíricos e teóricos dielétricos na faixa de frequência entre 1,4 e 18 GHz, foi realizada na Universidade de Kansas (EUA) por Hallikainen et al. (1985). As medições foram resumidas por expressões polinomiais dependentes tanto do índice volumétrico como da porcentagem de areia e argila contidas no solo. Uma comparação entre as constantes dielétricas ϵ calculadas do modelo empírico de Wang e Schmugge (1980) e os valores medidos em laboratório, em um comprimento de onda de 21 cm, é mostrada para três classes de textura dos solos na Figura 01.

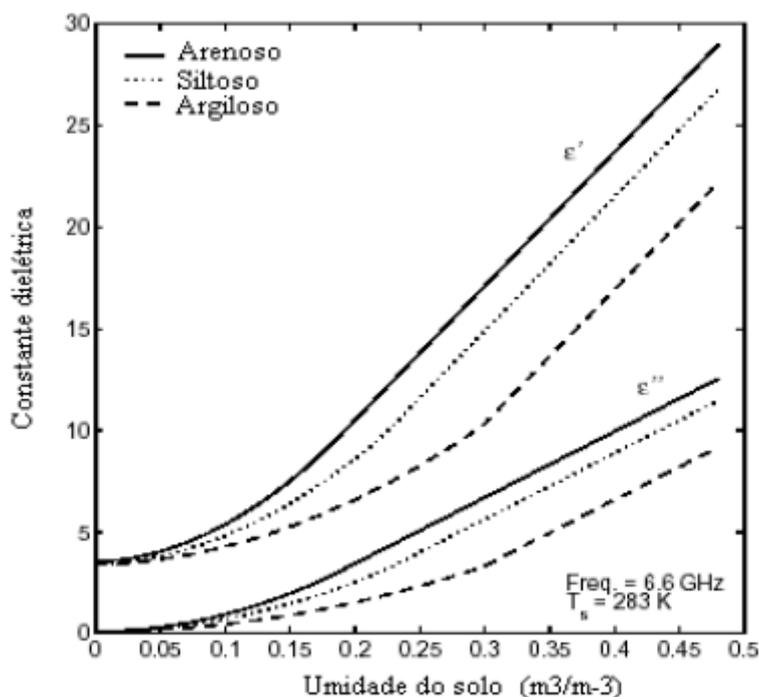


Figura 01- Comparação das constantes dielétricas para solos arenosos, siltosos e argilosos, as quais foram obtidas a partir do modelo de Wang-Schmugge. A parte real é designada por ϵ' e a parte imaginária por ϵ'' . Fonte: De Jeu (2003).

A radiação de microondas dos solos pode ser expressa através da lei Rayleigh, por meio de uma temperatura de brilho (T_b) que, por meios homogêneos de comunicação, está relacionado com a temperatura termodinâmica (T) da superfície emissora através de um fator e (emissividade), que leva em conta a perda de energia em uma superfície e depende das características de superfície e dinâmica dielétrica dos solos.

A emissividade é definida em função da refletividade R da superfície pela seguinte equação:

$$e_s = 1 - R \tag{2}$$

A refletividade da superfície pode ser calculada através do conhecimento da constante dielétrica do meio e das condições de contorno da superfície. Para uma superfície uniforme, e um meio de constante dielétrica uniforme, as expressões para a refletividade nas polarizações horizontal e vertical, respectivamente, podem ser derivadas através da teoria eletromagnética como (NJOKU E ENTEKHABI, 1996):

$$R_V = \frac{\left| \frac{\varepsilon \cos u - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 u}}{\varepsilon \cos u + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 u}} \right|^2}{\quad} \quad (3)$$

$$R_H = \frac{\left| \frac{\varepsilon \cos u - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 u}}{\varepsilon \cos u + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 u}} \right|^2}{\quad} \quad (4)$$

Onde ε é a constante dielétrica complexa de uma mistura solo-água ($\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon''i$), u é o ângulo de incidência do sensor e V e H referem-se à polarização da emissão radiação. Para simplificar a equação matemática, a constante dielétrica complexa da mistura solo-água, muitas vezes, ser expresso como k , que é o valor absoluto da constante dielétrica ($|\varepsilon| = k$).

A emissividade da superfície continental também pode ser estimada a partir de dados de satélite. Considerando dados de temperatura de brilho obtidos do sensor SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*), dados de temperatura de superfície e um modelo de transferência radiativa, Souza et al. (2000) estimaram a emissividade da superfície para todo o território brasileiro, para os canais 19 e 85 GHz, nos meses de julho e dezembro de 1997. Os resultados permitiram verificar que os padrões regionais e as mudanças sazonais nas estimativas da emissividade da superfície são consistentes com a topografia de grande escala e com a distribuição espacial da vegetação do território brasileiro.

2.3. Interferências da superfície terrestre em relação ao sinal de microondas

Alguns fatores interferem nas respostas de microondas que chegam ao sensor e podem ser corrigidos. A seguir citam-se alguns deles e o que foi feito para tentar minimizar os seus efeitos sobre as respostas de microondas.

Profundidade de amostragem térmica

Para fins práticos, a espessura total da camada superficial, que fornece a maior parte da contribuição da energia mensurável é definida como a profundidade de amostragem térmica. Este termo é muitas vezes confundido com a profundidade da pele ou profundidade de penetração do solo. A profundidade de amostragem é influenciada principalmente pela descontinuidade da constante dielétrica complexa total na superfície e próximo à subsuperfície constante. A profundidade de penetração, por outro lado está mais relacionada com a parte imaginária da constante dielétrica que leva à perda e atenuação do meio, determinando assim a profundidade no meio do qual a maioria da radiação originária atinge a superfície (NJOKU, 2008).

Rugosidade da superfície

A rugosidade da superfície aumenta a emissividade aparente de superfícies naturais, causada pelo espalhamento aumentado devido ao aumento da área superficial da emissão (De Jeu, 2004). A rugosidade da superfície também é determinada em função da emissividade da superfície, como dada pela Equação 2. Consequentemente, as expressões para a refletividade nas Equações 3 e 4 devem ser modificadas, considerando os efeitos do espalhamento para superfícies rugosas (NJOKU e ENTEKHABI, 1996). Foram desenvolvidas teorias aproximadas para modificar a refletividade para superfícies rugosas, porém um modelo mais simples de rugosidade empírica foi desenvolvido por Choudhury et al. (1979), o qual é descrito por De Jeu (2003) como:

$$e_{r(l)} = 1 - R_{(l)} \exp(-h \cos^2 u) \quad (5)$$

em que e_r é a emissividade da superfície rugosa, u é o ângulo de incidência do sensor, R a refletividade da superfície (calculada pelas equações 3 e 4) e h o parâmetro empírico de rugosidade dado por:

$$h = 4\sigma_s^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \quad (6)$$

sendo σ_s o desvio padrão da elevação da superfície do solo e λ o comprimento de onda.

A rugosidade também reduz a sensibilidade da emissividade para variações de umidade do solo, e, portanto, reduz o intervalo na emissividade mensurável de solo seco e úmido. Além disso, o caminho através da atmosfera entre a superfície e o sensor depende da elevação e também da inclinação da superfície emissora. No entanto este efeito só é significativo nas frequências que são afetadas por atenuação atmosférica, ou seja, as maiores que 10 GHz (DE JEU, 2004)

Foram criados modelos de algoritmos para tentar eliminar ou atenuar os efeitos da rugosidade na emissividade na radiação, sendo que a maioria atualmente já está incorporada aos algoritmos de processamento de informação do sinal (ROSSATO, 2010). Uma mudança no parâmetro de rugosidade de 0 para 0,3 corresponde a uma diferença na emissividade da superfície de cerca de 0,005 em condições de seca, para cerca de 0,014 na saturação. Existe alguma especulação de que o efeito da rugosidade da superfície é mínima na maioria das escalas locais tomadas por satélite, exceto em áreas de terreno montanhoso ou de relevo extremo. Van de Griend e Owe (1994) descobriram que uma rugosidade superficial de 0 gerou o menor valor quadrático médio de erros em umidade do solo derivada de satélite ao longo de um sítio de teste sul africano.

Efeitos da vegetação

Os efeitos da vegetação sobre a emissão de micro-ondas medida acima das copas são duplos. A vegetação pode absorver ou espalhar a radiação que é refletida pelo solo, mas também irá refletir a sua própria radiação. Em áreas de dossel suficientemente denso, a radiação emitida do solo será mascarada, e a emissividade observada será em grande parte devido à vegetação. A magnitude da absorção pelo dossel depende do comprimento de onda e do teor de água da vegetação (DE JEU, 2003).

Os comprimentos de onda mais utilizados para detecção de umidade do solo estão nas larguras de banda L e C ($\lambda \approx 21$ centímetros e 5 cm, respectivamente), embora apenas na banda L os sensores são capazes de penetrar a vegetação de qualquer densidade significativa. Enquanto as observações em todas as frequências estão sujeitas a espalhamento e absorção e requerem alguma correção, as faixas de onda mais curtas são especialmente suscetíveis às influências da vegetação (De Jeu, 2003).

Numerosos modelos de copa têm sido desenvolvidos para explicar os efeitos da vegetação (MO et al., 1982; ULABY et al., 1986; THEIS e BLANCHARD, 1986, VAN OEVELEN, 2000). Para este efeito o modelo de Mo et al. (1982) tem sido usado até o momento porque tem provado ser um modelo simples, que pode efetivamente estimar a radiação pela superfície do solo, mesmo sob vegetação (DE JEU, 2004). Neste, a temperatura de brilho é dada como uma simples equação de transferência radiativa:

$$T_{b(l)} = T_s e_{r(l)} \Gamma_{(l)} + (1 - \omega_{(l)}) T_c (1 - \Gamma_{(l)}) + (1 - e_{r(l)}) (1 - \omega_{(l)}) T_c (1 - \Gamma_{(l)}) \Gamma_{(l)} \quad (7)$$

em que T_s e T_c são as temperaturas do solo e do dossel, respectivamente, ω é o albedo de espalhamento simples e Γ a transmitância do dossel. O primeiro termo do lado direito da equação 7 define a radiação do solo; o segundo, a radiação direta ascendente da vegetação; e o terceiro, a radiação descendente da vegetação, refletida para cima pelo solo e atenuada pelo dossel.

Efeitos da atmosfera

A radiação eletromagnética emitida pela superfície do solo pode interagir com a atmosfera de duas formas, dependendo de como ela se propaga para um radiômetro a bordo de um satélite. Estas são as interações entre a radiação eletromagnética e gases: 1) atmosférica, principalmente de oxigênio e vapor d'água e 2) gotas de água existentes nas nuvens e chuva. O mecanismo de interação principal é a de absorção de energia pela atmosfera. No entanto, para frequências abaixo de 15 GHz, os efeitos são bastante pequenos e para frequências abaixo de 10 GHz os efeitos são insignificantes. O efeito das gotas de água das nuvens e da chuva pode ser um pouco mais significativo e depende em grande parte de dois fatores: da fase de estado das partículas (isto é, gelo ou

líquido) e do tamanho da partícula em relação ao comprimento de onda (DE JEU, 2004).

Além dos efeitos atmosféricos sobre a radiação emitida da superfície, há também um componente da radiação de fundo do céu, que é refletido de volta para o sensor e também um componente direto da atmosfera. Cada um desses componentes é mais afetado ou atenuado pela transmissividade atmosférica (DE JEU, 2004).

2.4. Os sensores passivos para microondas

Atualmente existem vários sensores radiômetros que atuam nas bandas das microondas que podem ser divididos em dois grandes grupos: sensores passivos e sensores ativos. Os principais sensores em microondas a bordo de satélites são o *Scanning Multifrequency Microwave Radiometer* (SMMR); *Special Satellite Microwave/Imager* (SSM/I); *Tropical Rainfall Measuring Mission-TRMM Microwave Imager* (TMI) e *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR), os quais estão associados, respectivamente aos satélites Nimbus, lançado em 1978 e operante até meados de 1987; DMSP, ativado em 1987; TRMM, lançado em novembro de 1997 e Aqua, ativo desde maio de 2002 (FU et al. 1988; GLOERSEN et al. (1977); KUMMEROW et al., 1998; NJOKU et al., 2008).

O AMSR-E incluiu melhorias na resolução espacial em comparação com os instrumentos de satélites anteriores e, além disso, os canais 6,9 e 10,7 GHz permitem a determinação da umidade do solo, da temperatura do gelo no mar e da temperatura da superfície do mar, as quais não são obtidas com o sensor SSM/I (Kummerow et al., 1998). Com o objetivo de desenvolver sensores com frequências mais baixas (canal 1,4 GHz) a fim de obter uma melhoria na informação global da umidade do solo, a Agência Espacial Européia (ESA) desenvolveu um sistema de sensor denominado missão Umidade do Solo e Salinidade Oceânica – *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS). O objetivo é observar duas variáveis, a umidade do solo sobre o continente e salinidade da superfície oceânica, por meios da radiometria em microondas na banda L. Esta banda é a menos afetada pela vegetação e, por essa razão, a mais apropriada para o monitoramento da umidade em regiões cobertas por vegetação esparsa a densa. Atualmente, um novo sensor na banda L está sendo desenvolvido para estimar a umidade do solo, cujo lançamento está previsto para 2013.

O sensor *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) fornecerá observações da umidade do solo em escala global, as quais serão utilizadas para melhorar a compreensão dos processos que relacionam os ciclos da água, de energia de carbono, e para melhorias em modelos de previsão de tempo e clima. O instrumento será composto de um radiômetro passivo e de um radar em banda L (1.20-1.41 GHz). A antena terá uma largura de faixa de 1000 km para fornecer uma cobertura global dentro de 3 dias no equador e 2 dias em latitudes boreais ($> 45^{\circ}\text{N}$) (ROSSATO, 2010). Estudos como de WEN e MA, 2003 e PARAJKA et al (2006) têm demonstrado que radiômetros passivos e orbitais que operam na faixa de microondas, como é o caso da plataforma Aqua/AMSR-E, podem estimar umidade volumétrica de solos com um erro médio quadrático da ordem de 1 a 2 %, porém a resolução espacial é pequena.

Os radiômetros passivos em microondas mais utilizados cobrem uma ampla faixa de frequências e, além da umidade do solo, possibilitam inferir informações sobre a textura do solo, a rugosidade da superfície, a profundidade óptica da vegetação e a

profundidade da camada de amostra do solo na faixa de microondas (NJOKU e ENTEKHABI, 1996).

A região em microondas é uma faixa restrita do espectro eletromagnético (Figura 02), cujo comprimento de onda varia de 1 m (0,3 GHz de frequência) até 1,0 mm (300 GHz de frequência). Neste intervalo, o sensor permite inferir informações da superfície sob intensas condições de nebulosidade, uma vez que as ondas eletromagnéticas sofrem pequena atenuação atmosférica e atravessam as nuvens (ULABY et al., 1986).

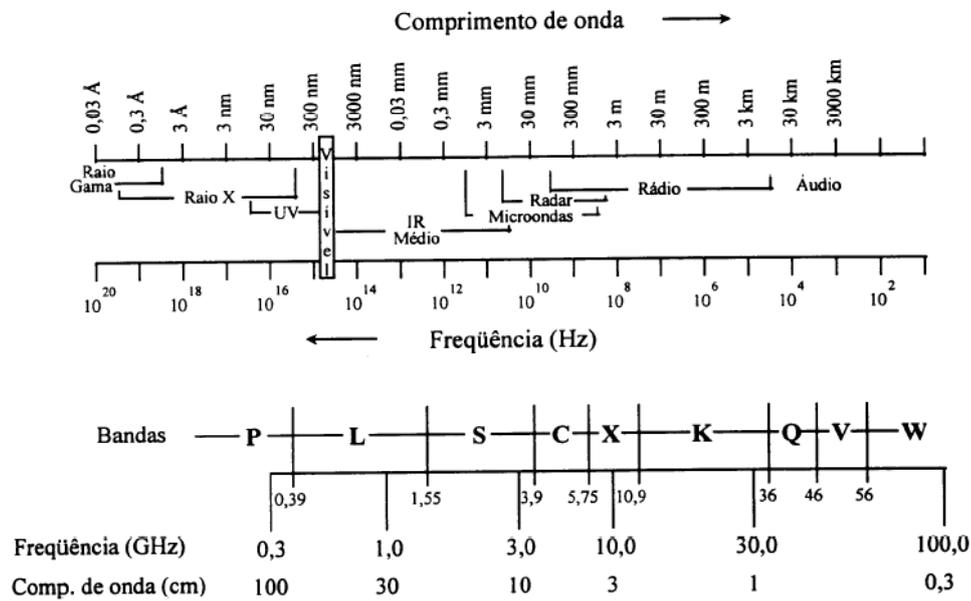


Figura 02 – Espectro eletromagnético – Fonte: Ulaby et al. (1986).

O sensoriamento remoto por microondas passiva está baseado na medida da radiação térmica da superfície. Para baixa frequência, esta radiação pode ser aproximada pelo produto da temperatura do solo e da emissividade da superfície (aproximação de Rayleigh-Jeans para a lei da radiação de Planck). Este produto é comumente chamado de temperatura de brilho (T_b):

$$T_{b(l)} \approx e_{s(l)} T \tag{8}$$

Considerando que os efeitos da vegetação, da rugosidade da superfície e do solo têm um papel significativo na emissão da superfície em microondas, diferentes aproximações têm sido desenvolvidas em diversos algoritmos. Tais algoritmos são

conhecidos como modelos de emissão em microondas da superfície terrestre (*Land Surface Microwave Emission Model - LSMEM*), os quais são utilizados para recuperar a umidade do solo a partir da temperatura de brilho. A base destes modelos é o modelo de transferência de ordem zero Omega-Tau (w-t) desenvolvido por Mo et al. (1982) como segue abaixo:

$$\epsilon_s = 1 + \frac{\rho_d}{\rho_s}(\epsilon_d^\alpha - 1) + M_v^\beta \epsilon_f^\alpha - M_v \quad (9)$$

$$\epsilon_d = (1.01 + 0.44\rho_s)^2 - 0.062 \quad \epsilon_f = 4.9 + \frac{74.1}{1 + if/18.4} \quad (10)$$

Onde ρ_d e ρ_s são as densidades de solo seco e de partículas do solo e M_v é o conteúdo volumétrico de umidade do solo. Os valores α e β são parâmetros dependentes da constante dielétrica e tipo de solo, respectivamente. “i” é uma unidade imaginária, e f é uma frequência do sensor.

O modelo w-t é uma aproximação simples que está baseado em dois parâmetros de entrada: w, o qual representa os efeitos do espalhamento dentro do dossel (albedo de espalhamento simples); e t, que representa a profundidade óptica da camada de vegetação. Considerando esta mesma metodologia, De Jeu (2003) estimou os parâmetros de superfície, tais como umidade do solo, temperatura do solo e profundidade óptica da vegetação, utilizando dados do satélite Nimbus/SMMR, os quais foram aplicados em diferentes frequências (6,6, 10,7, 18, 21 e 37 GHz). O modelo utilizado foi testado e os resultados foram comparados com medidas observacionais em 5 localidades: 3 nos Estados Unidos e 1 na Mongólia para o ano de 1983 e 1 na Turcomênia para o ano de 1982. Além disso, uma série de estudos para a validação foi efetuada, considerando análise de propagação de erros. A partir desta análise, De Jeu (2003) encontrou as seguintes diferenças quando comparou os dados obtidos por satélite com os observacionais: na resolução espacial – a umidade superficial derivada pelo modelo é uma média espacial integrada sobre a área de varredura, enquanto que os dados observacionais são pontuais; na resolução vertical - dados observacionais são para profundidades maiores, enquanto que o SMMR reflete somente o conteúdo de umidade da profundidade de amostragem em microondas, a qual é em torno de 2 cm; e nas diferenças na aquisição de tempo – dados observacionais e de satélite raramente foram obtidos para o mesmo dia.

O modelo de recuperação da informação sobre umidade do solo é apresentado a seguir de maneira simplificada:

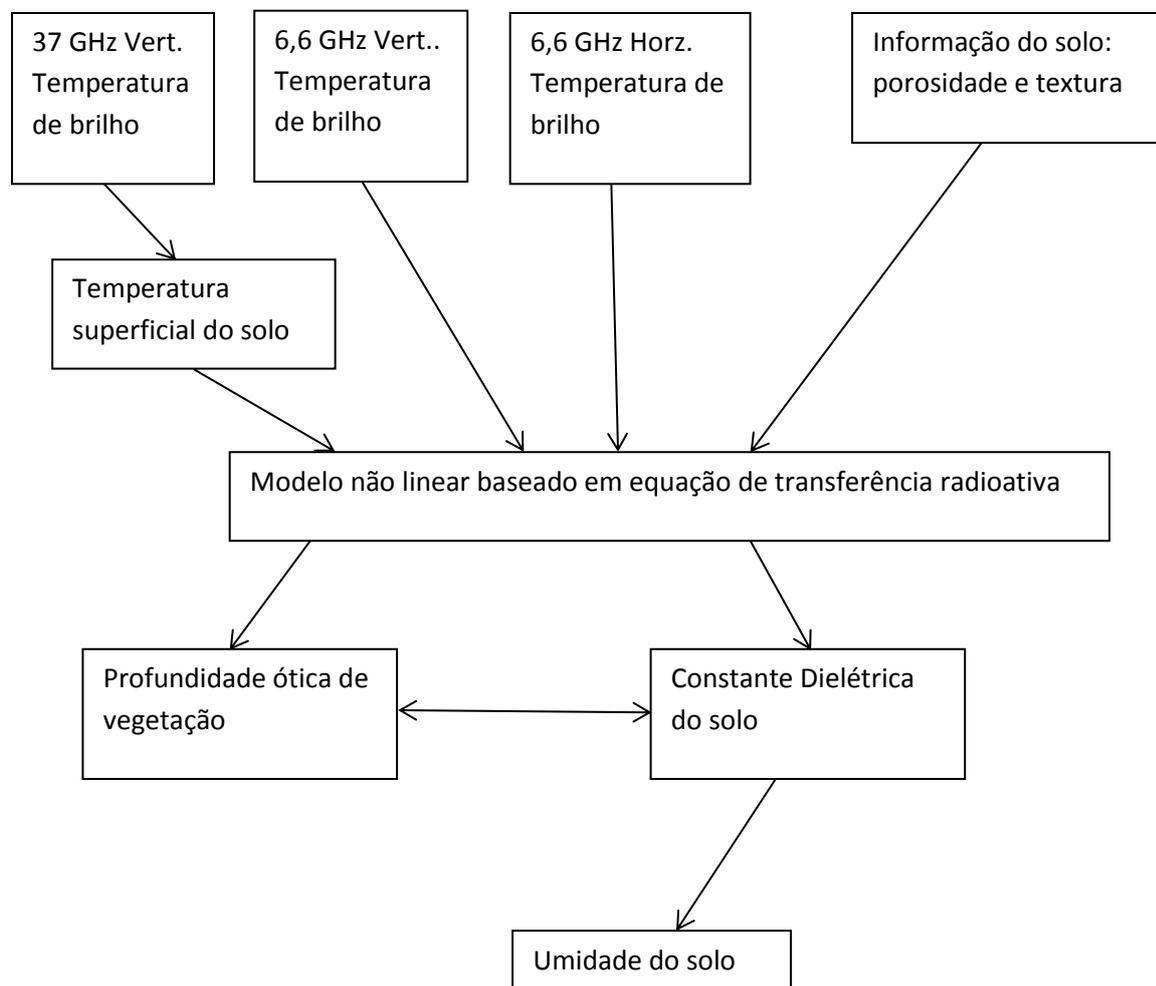


Figura 03 – Esquema simplificado do modelo de recuperação de informação do sensor AMSR-E – Fonte – DE JEU, 2003.

Os trabalhos de Owe et al. (2001) e de De Jeu (2003) são os resultados de uma cooperação entre a Agência Espacial Americana (NASA) e a Universidade Livre de Amsterdã (Vrije Universiteit – VU) para desenvolver o algoritmo de recuperação da umidade do solo, conhecido como *Land Parameter Retrieval Model – LPRM*, o qual recupera as informações de temperatura de superfície, de profundidade óptica da vegetação e da umidade superficial do solo. O LPRM foi desenvolvido para ser aplicado em escala global. No entanto, o mesmo tem sido aplicado somente para algumas regiões dos Estados Unidos, da Europa e da Ásia. Além disso, este algoritmo também pode ser utilizado para recuperar parâmetros de superfície através das observações de diferentes sensores.

A primeira geração de métodos para a recuperação de umidade do solo foi desenvolvida para observações com um sensor de mono-configuração em aeronaves

(isto é, uma polarização/canal de frequência e ângulo de visada do Nadir) (SCHMUGGE e JACKSON, 1994; JACKSON et al., 1993). Igualmente, novos métodos foram propostos para sistemas de sensores com multiconfiguração, ou seja, com observações em multifrequência, dupla polarização e multiangular. Por exemplo, o instrumento AMSR-E (*Advanced Microwave Scanning Radiometer - Radiômetro de Varredura Avançada de Microondas*), a bordo do satélite Aqua, fornece dados de dupla-polarização e multi-frequências.

O AMSR é um sucessor em tecnologia dos sensores SMMR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*) e SSM/I (*Special Sensor Microwave Imager*), a bordo dos satélites Nimbus-7 e DMSP, respectivamente. A vantagem do AMSR-E sobre o SMMR e o SSM/I é que o sistema radiômetro de microondas mede temperaturas de brilho em 6,925 e 10,65 GHz com uma melhor resolução para a determinação da umidade do solo em relação aos satélites anteriores (Tabela 01).

Tabela 01. Dados comparativos entre sensores de microondas. Fonte: NASA, 2011.

Frequência (GHz)	Resolução (km)			
	SSM/R 1978-85	SSM/I 1987-pres	AMSE-E 2002-pres	AMSR 2002-pres
6,6-6,9	148×95		75×43	70×40
10,7-10,9	91×59		51×29	46×27
18,7-19,4	55×41	69×43	27×16	25×14
22-23,8	46×30	60×40*	32×18	29×17
36-37	27×18	37×29	14×8	14×8
50,3/52,8				10×6*
85-89		15×13	6×4	6×3

*V- somente polarização

Observações da umidade do solo derivadas a partir de radiômetros em microondas têm possibilitado diversas aplicações, incluindo os balanços superficiais de energia e de água, a modelagem hidrológica de grande escala, a previsão numérica de tempo, a modelagem climática, o monitoramento de enchentes e as mudanças da cobertura da terra. O estudo da variabilidade das características físicas da superfície terrestre (tais como temperatura do solo, profundidade óptica da vegetação e umidade do solo) fornece informações sobre as mudanças climáticas e/ou atividades humanas. Produtos de umidade do solo derivadas do satélite já estão sendo usados com sucesso para a previsão de seca (LOEW et al., 2009), a predição da produtividade (de Wit e van

Diepen, 2007), e previsão de cheias (PARAJKA et al., 2006) e estão previstas para ser utilizados em modelos de Previsão Numérica do Tempo (HOLMES et al., 2008).

A plataforma que serve de suporte ao sensor AMSR-E é o satélite AQUA que faz parte de um conjunto de satélites de órbita quase polar, denominados como satélites da série da Agência Nacional de Administração Atmosférica e Oceânica (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) – circulam constantemente a Terra numa órbita muito próxima da direção norte-sul, passando próximo de ambos os pólos. As órbitas são circulares, com uma altitude entre 830 km (órbita da manhã) e 870 km (órbita da tarde), e são síncronas com o Sol. A órbita da manhã cruza o Equador às 07:30 (horário local) enquanto a órbita da tarde cruza às 13:40 (horário local) (NASA, 2011).

As órbitas circulares permitem uma aquisição uniforme de dados pelo satélite e um controle eficiente do satélite em órbita pelas Estações de Comando da NASA. Os satélites quase polares são capazes de monitorar toda a Terra, registrando variáveis atmosféricas e fornecendo dados ambientais e atmosféricos e imagens de nuvens. Eles podem acompanhar condições atmosféricas que afetam o tempo e o clima dos diversos países.

Os satélites fornecem dados de radiômetro nas faixas do visível e do infravermelho que são usados para a finalidade de criação de imagens, medições de radiação, e determinação de perfis de temperatura e de umidade. Os sensores do ultravioleta também fornecem os níveis de ozônio na atmosfera e são capazes de detectar a falha de ozônio sobre a Antártida. Estas informações são também utilizadas nos modelos de previsão do tempo, especialmente para remotas áreas oceânicas, onde dados convencionais não existem.

A Agência Americana NOAA opera ou operou mais de sete satélites de órbita polar. Os chamados satélites da série NOAA K, L, M, possuem sensores mais aperfeiçoados, e iniciou-se com o lançamento do NOAA-15 em maio de 1998, culminando com o lançamento do NOAA-19 e opera com, no mínimo, dois satélites posicionados em órbita quase polar heliossíncrona a aproximadamente 835 km de altitude. O sistema atual obtém imagens multiespectrais da superfície terrestre (captadas pelo sensor AVHRR-3) e adquire dados numéricos coletados por meio de sondas (obtidas pelo sensor ATOVS). Os dados gerados pelos satélites NOAA são utilizados, sobretudo, em modelos climáticos e de previsão do tempo atmosférico. Atualmente, a NOAA está operando cinco satélites polares. Uma nova série de satélites polares, com sensores melhorados, foi iniciada com o lançamento de NPP em outubro de 2011. O mais recente satélite é o NOAA-19, lançado a 07 fevereiro de 2009. NOAA-18, NOAA-17, NOAA-16 e NOAA-15 continuam transmitindo todos os dados em stand-by. O NOAA-19 é classificado como o satélite "operacional" e também possui os sensores Imager, Sound, SEM, SXI e SAR. O satélite NOAA-18 possui um sensor de umidade da atmosfera denominado AMSU e a série lançada em outubro de 2011 possui o sensor de umidade e temperatura ATMS (Fonte: <http://www.noaa.gov/>).

O Satélite Aqua, lançado em maio de 2002, consiste de um sistema orbital quase polar, síncrona com o Sol, com uma altitude de 705 km, cruzando o Equador às 13:30 da tarde (hora local) em órbita ascendente, para satisfazer uma importante missão da NASA de coleta de uma grande quantidade de informações sobre o ciclo da água no planeta, incluindo evaporação da água nos oceanos, vapor d'água na atmosfera, nuvens, precipitação, umidade do solo, gelo nos oceanos, gelo na terra, e cobertura de neve nos solos. Variáveis adicionais também são medidas pelo satélite AQUA incluindo fluxo de energia radiativa, aerossóis, cobertura da vegetação nos solos, fitoplâncton e matéria orgânica dissolvida nos oceanos, e temperaturas do ar, da água e da terra. A bordo do satélite Aqua estão os seguintes instrumentos: o espectro radiômetro MODIS; o radiômetro AMSR-E; o sondador atmosférico no infravermelho (AIRS – Atmospheric Infrared Sounder); o sondador avançado AMSU-A, o sistema CERES e o sondador de umidade brasileiro (HSB - Humidity Sounder for Brazil) (NASA, 2011).

O sensor AMSR-E detecta passivamente emissões de microondas nas sete frequências citadas na Tabela 01. Cada frequência possui um canal vertical e um horizontal. Os dados brutos são calibrados para uma medida de energia ou temperatura de brilho denominada Tb. Um objeto altamente polarizado (por exemplo, água) terá um sinal muito mais forte vertical, enquanto um objeto de baixa polarização (ex.: vegetação densa) terá apenas um sinal muito ligeiramente vertical. Alguns objetos são altamente emissivos (solo, por exemplo, seco), enquanto outros são dispersores (por exemplo, cristais de gelo). Algoritmos são desenvolvidos utilizando várias técnicas utilizando princípios destes objetos e de outros (por exemplo, a teoria de transferência radiativa. A figura 03 ilustra algumas noções básicas de radiação de microondas em um sentido puramente relativo. Cada canal tem suas próprias características e outros fatores tais como ângulo de varredura e resolução espacial desempenham um papel importante na determinação da Tb (NASA, 2011).

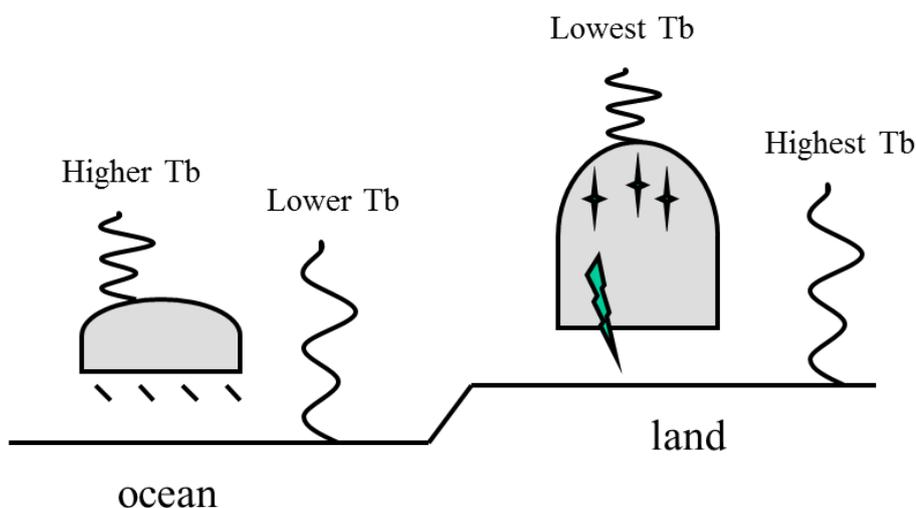


Figura 04 – Diagrama de referência em relação à Tb. Fonte: NASA, 2011.

O Sensor AMSR-E e as imagens geradas por ele, realizadas com a radiação de microondas da Terra, nas bandas C e X (K) são sensíveis à umidade do solo e cobertura vegetal, mas com sensibilidades diferentes que permitem a separação da informação da umidade do solo e da vegetação. A vantagem em usar essas imagens é ter boa resolução temporal e espectral, caracterizando um estudo mais completo da umidade do solo e da temperatura da superfície do solo ao longo de um período. As características do sensor são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 02. Frequências e resoluções do sensor AMSR-E. Fonte: NASA, 2011.

Sensor	Canais/Bandas Espectrais	Frequências GHz	Ângulo de Visada	Polarização	Resolução Espacial Km	Resolução Temporal	Área Imageada Km
AMSR-E	Banda K	6,925	55°	Horizontal e Vertical	75 x 43	diária	1445
		10,65			51 x 29		
		18,7			27 x 16		
		23,8			32 x 18		
		36,5			14 x 8		
		89			6 x 4		

A frequente revisita temporal é importante para aplicações hidrológicas, especialmente para obter uma amostragem adequada da superfície de molhamento e secagem, entre os eventos de precipitação. A cobertura temporal e a revisita das observações de superfície são determinadas pela largura de faixa e a altitude da órbita e da inclinação (que determinam a faixa padrão). Para o AMSR-E, uma cobertura global é feita a cada dois dias ou menos, separadamente para as passagens ascendentes e descendentes, com exceção de uma pequena região perto dos pólos. (Fonte: NASA, 2011)

A atmosfera é quase transparente às frequências de microondas, que permitem medições de todas as condições meteorológicas. A radiação de microondas penetra as copas das plantas e as medidas são independentes da radiação solar, o que permite fazer observações de dia e de noite.

A parcela de microondas do espectro eletromagnético provoca um grande contraste entre a água e o solo seco, oferecendo um grande potencial para o monitoramento da umidade do solo e que, portanto, domina o uso do sensoriamento remoto para detecção da umidade do solo. Comprimentos de onda de microondas de baixas frequências, (1-5 GHz), são especialmente interessantes porque há um contraste muito grande entre os solos secos e molhados, além de pouca absorção pela atmosfera, e

baixa dispersão pelo dossel da vegetação, resultando na análise de grandes áreas com pouco ou nenhum sinal de contaminação (DE JEU, 2004).

Para avaliar o potencial de monitoramento da umidade na camada superficial do solo a partir de informações obtidas por satélite, De Jeu (2003) analisou como esta variável responde à precipitação. Para isto, comparou a variação da umidade do solo da camada superficial do solo estimada a partir de dados de satélite com a circulação de monção na Índia para o ano de 1983 e verificou que a umidade do solo mensal está relacionada com as características monçônicas típicas da região e com a precipitação mensal. Portanto, De Jeu (2003) concluiu que a umidade da camada superficial do solo derivada por satélite é uma poderosa ferramenta para a detecção do conteúdo de água no solo em regiões semiáridas, bem como para diversas aplicações envolvendo os processos entre a superfície e a atmosfera.

De Jeu (2011) comparou ainda dados do sensor AMSR-E com dados superficiais de precipitação na Austrália. Nesse estudo para verificar se os dados de umidade do solo derivados do sensor AMSR-E descrevem um padrão espacial sensível em toda a Austrália, foram visualmente comparados com mapas de precipitação do dia anterior à coleta do sensor (na ausência de dados *in situ* da umidade do solo para a maioria da Austrália). Mapas de precipitação foram derivados das observações diárias do escritório australiano, que fornece dados de precipitação nas 24 horas anteriores às 09:00 da manhã. Estes foram comparados a dados resultantes do sensor AMSR-E na passagem ascendente do AQUA, que observa a Austrália várias horas depois, às 13:30 horas aproximadamente. Uma vez que a precipitação é a força dominante sobre a umidade do solo, uma forte relação espacial é esperada entre os dois campos. Os dados AMSR-E utilizados não foram filtrados por fatores como vegetação densa ou pixels mistos terra / água, que são conhecidos por violar os pressupostos de transferência radiativa do solo em algoritmos de recuperação de umidade. Nos resultados do estudo, pode-se observar que houve uma correspondência entre a precipitação e a umidade do solo estimada pelo sensor. Os dados do sensor foram rescalonados e analisados no seu comportamento temporal para serem comparados aos dados de precipitação. Os dados da banda C apresentaram melhor resultado do que os dados da banda X, quando comparados ao modelo de dados terrestre. Com um coeficiente de correlação médio entre os dados de campo e os dados do sensor trabalhados pelo algoritmo VUE-NASA (modelo desenvolvido pela NASA em conjunto com a universidade Livre de Amsterdã) foi de 0,79. O comportamento da umidade do solo em uma estação terrestre única (ou a média de um modesto número de estações no caso de Kyeamba e Adelong) pode ser diferente da estimada pelo sensoriamento remoto, já que esta é uma área média (mais de dezenas de km, no caso de AMSR-E) e diferentes processos de controle da umidade do solo se dinamizam em cada uma dessas escalas. Pode haver grandes diferenças entre os dois tipos de dados, onde os dados do sensor podem responder mais rapidamente às chuvas e evaporação, do que os dados tomados no solo, pois a influência de camadas maiores de solo alteram as respostas da umidade deste. Isso explica algumas das rápidas

variabilidades nos produtos AMSR E. No entanto, algumas dessas variabilidades podem ser devido ao ruído no sinal de microondas.

Os produtos padrão do *Advanced Microwave Scanning Radiometer* (AMSR) são disponibilizados pelo centro de observação da Terra JAXA *Earth Observation Center* (EOC) desde dezembro de 2003 e pela NASA. Os produtos disponibilizados são os seguintes:

- * Level1A (Sensor de informação geométrica e radiométrica)
- * Level1B (Temperatura de brilho convertido de L1A)
- * Level1B Map (Produtos de mapas construídos a partir do L1B subset)
- * Level2 (parâmetros geofísicos obtidos a partir do produto L1B)
- * Level2 Map (Produto projetado no mapa a partir do produto L2 subset)
- * Level3 (Produto diário e mensal da média mundial de L1B e L2)

Tabela 03- Produtos disponibilizados pela NASA resultantes do sensor AMSR-E:

Nome do Produto	Descrição
1A	Dados brutos observados pelo sensor. É o produto que é processado no nível 0 de dados para a correção radiométrica e geométrica.
1B	Temperatura de brilho que se transforma a partir da temperatura de antena no nível 1A por coeficientes de transformação.
2	Quantidade geofísica para água, vapor de água (WV), nuvem de água líquida (CLW), precipitação (AP), velocidade do vento de superfície do mar (SSW), temperatura da superfície do mar (SST), concentração de gelo do mar (IC), a neve de água equivalente (SWE), e umidade do solo (SM), são calculados a partir do nível 1B.
3	Média dos dados calculada a partir dos produtos “level 1B or level 2” , e projetado em cada mapa equiretangular e estereográfico polar.
1B Map	Projeção do produto “ level 1B” no mapa.
2Map	Projeção do produto “level 2” no mapa.

Fonte: NASA, 2011.

Os produtos são disponibilizados de forma bruta e trabalhados a partir da aplicação de algoritmos que retirem a informação. O principal algoritmo desenvolvido

foi o do Professor Toshio Koike (Koike et al., 2004), o qual está disponível no site em questão.

Um dos produtos mais usados é o AMSR-E Nível 2 produto *standard* (versão 2.0), sobre a umidade do solo. Ele cobre toda superfície terrestre global com exceção das massas de terra permanentes de gelo na Groenlândia e na Antártida, e a área de floresta densa. Estudos realizados com base nos dados AMSR-E da Mongólia em outubro 2002 a Set 2003 (com exceção da época de Inverno) e dados de observação de campo, apontaram um erro padrão como sendo de 0,043 g/cm³ (DE JEU, 2004). Outros estudos foram realizados por projetos nos Estados Unidos, Austrália e em mais algumas regiões do Globo.

No Brasil o uso deste sensor foi estudado para a região dos cerrados (GIAROLLA, 2006) onde foram analisadas as variações temporais e espaciais da umidade do solo. O objetivo foi validar os dados recebidos do satélite durante a época chuvosa e compará-los com os dados de superfície obtidos através das estações meteorológicas. Desde então se formou um grupo dedicado que criou e mantém um banco de dados para a região do Cerrado. A partir de junho de 2004 iniciou-se outra campanha, de menor porte, com o objetivo de coletar dados na época seca por parte da EMBRAPA. São também necessários, para que a pesquisa possa ser aprofundada, os dados (de campo) de vegetação e solo. O Brasil poderá fornecer dados sobre essas áreas e outras que venham a ser estudadas, no sentido de enriquecer e validar as detecções realizadas pelo sensor AMSR-E. O INPE recebe os dados desse sensor em sua estação de recepção em Cuiabá, envia à DSA, em Cachoeira Paulista e converte os dados em temperatura de brilho por meio de um programa decodificador. Este é o primeiro pré-processamento. A partir daí, outro programa é ajustado para a obtenção da estimativa de umidade de solo na camada superficial a partir de, entre outros fatores, dados de tipos de solos e características físicas. São necessários ajustes para correção de possíveis erros (INPE, 2011).

O projeto SMEX03 (*Soil Moisture Experiment 2003*) constituiu-se numa estratégia de análise de dados de satélite em uma campanha brasileira. O objetivo da SMEX03 Brasil foi validar algoritmos existentes para recuperar umidade solo do Aqua / AMSR-E em dados com cobertura vegetal de savana tropical. O local do teste correspondeu à região de Barreiras, localizada na parte ocidental do Estado da Bahia (12°05 'de latitude sul; 45°00 'de longitude oeste). O local de estudo oferece baixa cobertura vegetal intermediária (perto da fronteira da vegetação semiárida chamada Caatinga), topografia suave e grandes campos de culturas anuais (principalmente soja e milho) e pastagens cultivadas. Dados de campo de umidade do solo de superfície, temperatura do solo e conteúdo de água na folha foram adquiridos durante a estação chuvosa de dezembro de 2003 sobre um conjunto de 12 locais de amostragem. Outras três campanhas de campo ocorreram em 2004 (junho, fim da temporada úmida, agosto, época da seca; e novembro, início da estação chuvosa). A análise de dados incluiu o processamento de todas as imagens AMSR E de temperatura de brilho de 2004, com elevação máxima superior a 80° (3-4 cenas por mês). Após foram analisados mais locais

e os resultados obtidos através do LPRM foram validados com dados medidos em campo, ou seja, com dados obtidos no âmbito do Experimento de Umidade do Solo (SMEX03) realizado em Barreiras, BA; dados coletados no Bananal, TO; e no sítio Pé de Gigante, situado em Santa Rita do Passa Quatro, SP. A partir desta análise, verificou-se que a estimativa da umidade superficial do solo derivada a partir das informações do sensor AMSR-E foi mais acurada para a banda C e deu bons resultados no que refere a áreas com pouca ou nenhuma cobertura vegetal (ROSSATO, 2010).

Este é um produto que estima índices de umidade e não os mede diretamente. Os dados de campo são concretos, mas são pouquíssimas as estações meteorológicas que medem esse elemento no Brasil. Já os dados do satélite são estimados em escala espacial que abrange todo o território brasileiro. Em suma, o ideal é que se estude o potencial de análise do sensor para outras regiões de características diferenciadas das regiões já estudadas. Além disso, o uso desse tipo de dado gerado ganha vantagem sobre outros, no que se refere a custo de aquisição, a resolução temporal e características do tipo de sinal analisado. Sabe-se da bibliografia disponível (JENSEN, 2000) que técnicas de radar que atuam com microondas ativo podem ser até mais úteis do ponto de vista de resolução espacial, mas são de alto custo, principalmente quando se quer estudar grandes áreas.

Já existem medições de umidade de solo efetuadas em campo a partir de equipamentos fisicamente distribuídos no território nacional, mas medidas a partir de dados de satélite ainda não estão disponíveis. Esse é o caráter inédito do produto. A NASA já possui pesquisas em andamento, mas muito pouco se tem sobre a validação e ajuste desses dados no Brasil (ROSSATO, 2010).

Uma vantagem de sensores em microondas (em contraste ao visível e infravermelho) é que observações podem ser feitas através da cobertura de nuvens, devido à atmosfera ser quase transparente (particularmente para frequências < 10 GHz). Além disso, estas medidas não são dependentes da iluminação solar e podem ser feitas em qualquer hora do dia ou da noite. Tais instrumentos podem ser montados em aviões ou espaçonaves para observações repetitivas em grandes áreas (NASA).

Quanto a outros sensores existentes em órbitas a bordo de satélites também há uma aproximação do dado de umidade, uma vez que a maioria deles não utiliza a coleta direta do dado e sim uma inferência do dado de umidade a partir de outros dados. O sensor que mais se aproxima das características do AMSR-E é o sensor AVHRR que pertence ao programa NOAA. Mesmo assim podem-se comparar as vantagens do primeiro em relação ao segundo, no que diz respeito à resolução radiométrica e à resolução temporal que é superior, conforme De Jeu (2003).

Para o presente trabalho é de interesse entender o produto do Nível 3 na segunda versão (L3.2), o qual contém os dados Globais, que são os dados médios diários ou mensais de cada resposta geofísica, tal como temperatura de brilho no produto de nível 1B ou umidade do solo (*Soil Moisture*) no produto nível 2. Os dados no nível 3 são calculados a partir da média diária ou mensal em cada direção, como a

ascendente ou descendente e projetados para o sistema estereográfico polar. A parte do cabeçalho é composta de metadados, os quais descrevem as informações sobre um produto. Na Figura 04 verifica-se a estrutura do produto do nível 3, com o cabeçalho e os dados. Existem 3 tipos de armazenamento do produto no nível 3. No caso de dados em projeção equirectangular os dados são armazenados como um SDS (arquivo raster) de matriz de duas dimensões, 304 pontos por pixel e 448 linhas. Em projeção estéreo polar é 316 pixels e 448 linhas, ou 431 pixels e 573 linhas. No caso de estéreo polar de TB ou IC médio, somente em torno do pólo norte ou sul, são armazenados em SDS (NJOKU, 2008).

Este conjunto de dados fornece a umidade do solo global, com uma elevada resolução temporal (dia, noite) e baixa resolução espacial (0,25 graus ou 25 km de pixel) e é limitado a cerca de poucos centímetros do topo do solo. Os dados de umidade do solo são expressos em valores volumétricos ($m^3 m^{-3}$).

Este produto é derivado de acordo com os parâmetros do modelo de Superfície (LPRM) (OWE et al. 2008). O LPRM é um modelo de recuperação de três parâmetros para os dados de microondas passivas e é baseado em um modelo de transferência radiativa de microondas que liga variáveis geofísicas de superfície (umidade do solo, ou seja, teor de água, vegetação e solo / temperatura do dossel) para as temperaturas de brilho observadas. Ele usa o canal dual polarizado (ou 6,925 ou 10.65GHz) para a recuperação de umidade superficial do solo e teor de água da vegetação. A temperatura da superfície da terra é derivada em separado do canal polarizado verticalmente 36.5GHz.

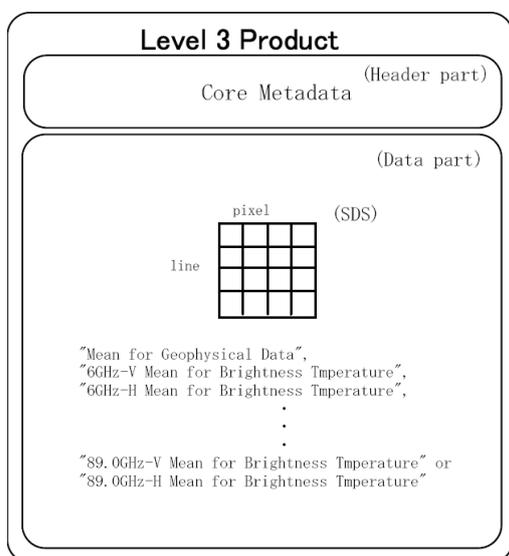


Figura 05 – Estrutura do Produto utilizado L3.2. Fonte: JAXA, 2011.

Em um software de processamento matemático se procede às entradas de dados em nível 1B ou de nível 2, se projeta os dados em um mapa, calcula a média, e as saídas do produto em nível 3, cujo tipo é um arquivo no formato HDF (*Hierarchical Data Format*). A média dos dados é calculada por dia ou mês. O produto L3.2 contém análise

de uma série de produtos gerados pela aplicação de algoritmos e que são sintetizados por este (Tabela 04). Cada produto gerado depende do dado de origem, ou seja, para gerar umidade do solo Global, é necessário tomar o dado de “*soil moisture*” do nível 2.

Tabela 04 – Produtos utilizados para gerar o produto L3.2. Fonte: Adaptado de JAXA, 2011.

Código Produto	Característica geofísica	Período Calculado	Método de Cálculo da média	Unidade do Dado	Projeção Cartográfica
Tb	Temperatura de Brilho	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular Polar estéreo
WV	Vapor de água	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular
CLW	Água líquida na Nuvem	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular
AP	Precipitação Pluvial	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular
SSW	Velocidade do vento superficial do oceano	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular
SST	Temperatura superficial do oceano	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular
IC	Concentração de gelo	Dia ou mês	Média simples	Global	Polar estéreo
SWE	Água presente na neve	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular Polar estéreo
SM	Umidade do solo	Dia ou mês	Média simples	Global	Equiretangular

3. Materiais e Métodos

Para analisar e entender a validade de uso dos dados do sensor AMSR-E para o Rio Grande do Sul tomou-se o ano de 2009. Ao longo deste ano foram detectados alguns períodos mais secos e períodos mais úmidos, inferidos a partir da precipitação pluvial ocorrida, uma vez que dados diretos de umidade do solo não existiam ou não estavam disponíveis para área e período de estudo. O algoritmo utilizado para a recuperação da umidade do solo foi o LPRM (*Land Parameter Retrieval Model*), incluindo a metodologia proposta por MEESTERS et al. (2005). Este modelo foi desenvolvido por pesquisadores da Agência Espacial Americana (NASA) e da Universidade Livre de Amsterdã (*Vrije Universiteit* – VU). Como parâmetros de entrada, o LPRM utilizou a temperatura da vegetação, albedo de espalhamento simples, temperatura efetiva da camada emissora da superfície do solo, emissividade da superfície do solo e transmissividade da vegetação.

3.1. A área de estudo

3.1.1 Características físicas

A área de estudo localiza-se no oeste do Rio Grande do Sul e está apresentada na Figura 05. Um dos motivos da escolha desta região foi o aspecto relativamente plano que a mesma revela em relação ao relevo (Figura 06), sendo caracterizada por variações suaves nas inclinações das vertentes e com isso apresentando menores variações em relação aos tipos de solos e à influência das precipitações pluviais. A delimitação da área de estudo foi feita a partir da delimitação de algumas bacias hidrográficas, uma vez que a bacia hidrográfica estabelece a dinâmica do escoamento da água da precipitação pluvial. A Figura 05 mostra, através do mapa, as bacias hidrográficas que compõe a região escolhida:

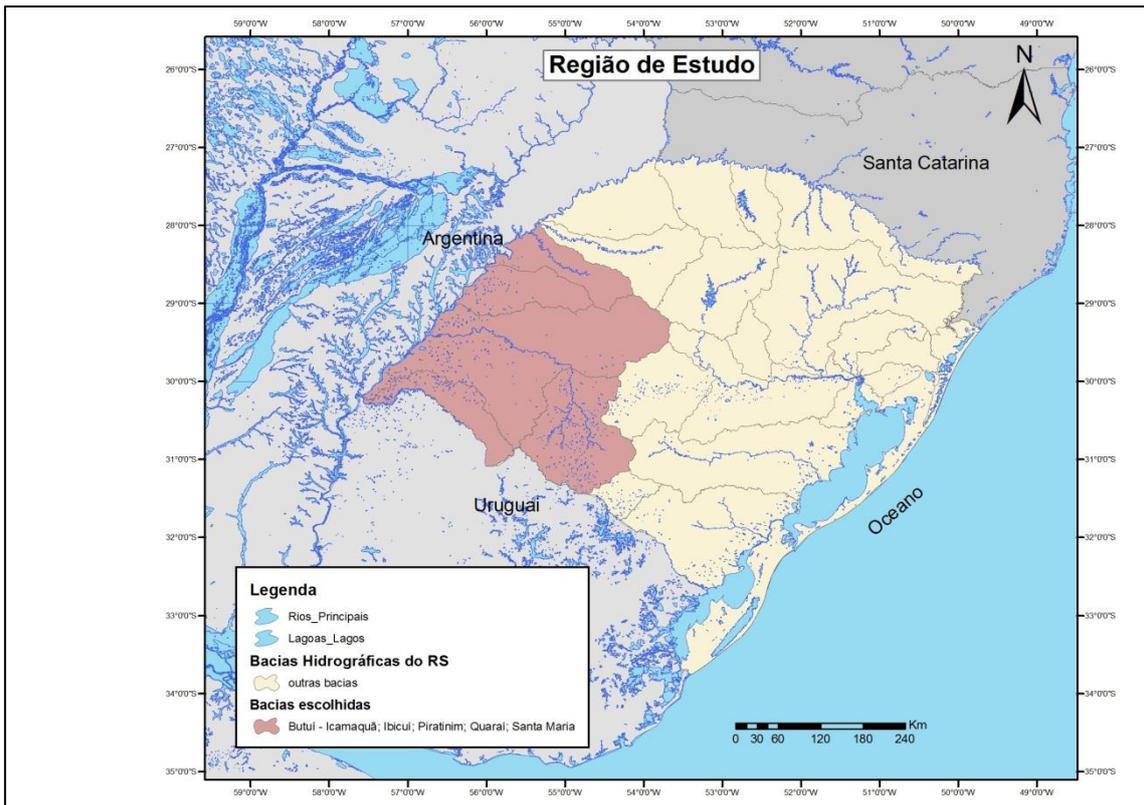


Figura 06 – Mapa do Estado do Rio Grande do Sul salientada a área de estudo – Fonte: DRH, 2010.

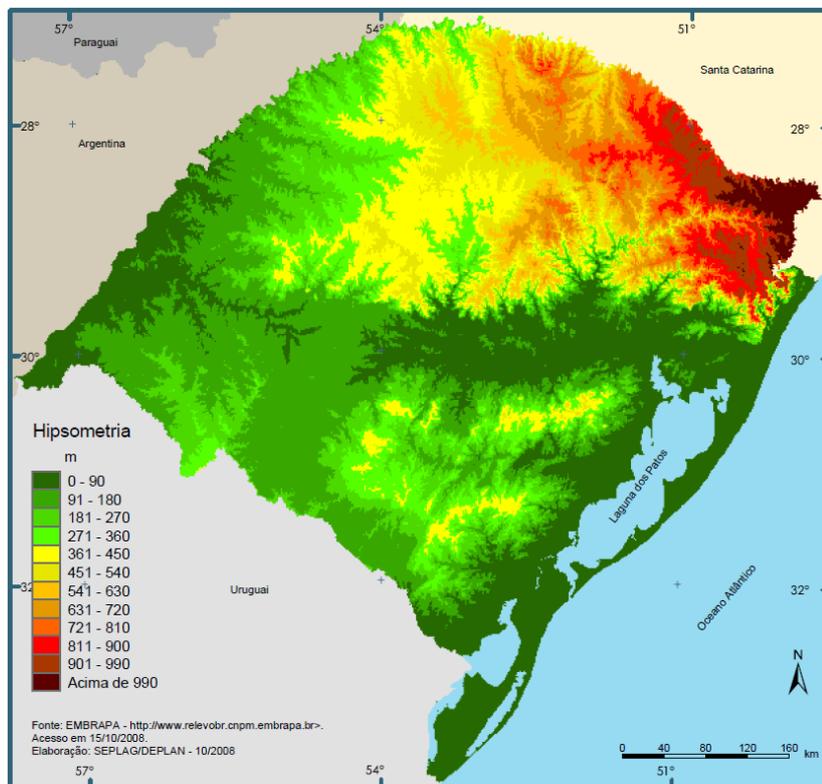


Figura 07 – Mapa de relevo do Rio Grande do Sul – Fonte: SEPLAG, 2011)

Para entender melhor a escolha da área de estudo, caracterizam-se a seguir as mesmas bacias hidrográficas que ocorrem na região, baseado nos relatórios anuais de recursos hídricos da Secretaria Estadual de Meio Ambiente do RS (DRH, 2010).

A Bacia Hidrográfica do rio Ibicuí localiza-se a oeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°53' a 30°51' de latitude Sul e 53°39' a 57°36' de longitude Oeste. Abrange as províncias geomorfológicas Planalto Meridional e Depressão Central. Possui área de 35.495,38 km² e população estimada em 394.030 habitantes, abrangendo municípios como Alegrete, Júlio de Castilhos, Santana do Livramento, São Pedro do Sul e Uruguai. Os principais corpos de água são os rios Ibicuí, Itu, Ibirapuitã, Jaguari e um trecho do Rio Uruguai. Dentro do território brasileiro, o principal afluente do rio Uruguai é o Ibicuí. Sua formação dá-se na junção do Ibicuí-Mirim com o rio Santa Maria e a desembocadura é no Rio Uruguai. O principal uso da água nesta bacia se destina a irrigação. Este uso pode ocasionar insuficiência hídrica nos meses de verão, principalmente devido à irrigação do arroz.

A Bacia Hidrográfica do rio Piratinim situa-se a noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°00' a 29°05' de latitude Sul e 54°05' a 56°00' de longitude Oeste. Abrange a Província Geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 7.596,07 Km², abrangendo municípios como Bossoroca, Santo Antônio das Missões, São Luis Gonzaga e São Miguel das Missões, com população estimada em 70.639 habitantes. Os principais cursos de água são os arroios Inhacapedum, Itu, Chuní, Ximbocú e o Rio Piratinim. Os principais usos da água se destinam a irrigação, dessedentação animal e abastecimento humano. Pode ocorrer insuficiência hídrica nos meses de baixa vazão, principalmente no verão.

A Bacia Hidrográfica do rio Quaraí situa-se a oeste-sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°40' a 30°30' de latitude Sul e 56°30' a 57°40' de longitude Oeste. Abrange a Província geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 6.471,77 Km² e população estimada em 29.885 habitantes, abrangendo municípios como Barra do Quaraí, Quaraí, Santana do Livramento e Uruguai. Os principais cursos de água são os arroios Moirões, Sarandi, Quaraí-mirim, Garupa, Capivari e o Rio Quaraí. O uso de água nesta bacia tem como destino principal a irrigação. Os maiores problemas estão relacionados à insuficiência hídrica nos meses de menor disponibilidade, principalmente no verão e as grandes demandas para irrigação de arroz.

A Bacia Hidrográfica do rio Santa Maria situa-se a sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' de latitude Sul e 54°00' a 55°32' de longitude Oeste. Abrange as Províncias Geomorfológicas Planalto Meridional e Depressão Central. Possui área de 15.609,11 km², abrangendo municípios como Bagé, Dom Pedrito, Rosário do Sul, Santana do Livramento e São Gabriel, com população estimada em 220.296 habitantes. Os principais cursos de água são os arroios Três Divisas, da Divisa, da Cruz e os rios Santa Maria, Cacequi e Upamaroti. O rio Santa Maria nasce a nordeste do município de Dom Pedrito e desemboca no rio Ibicuí.

O principal uso de água se destina à irrigação. Déficits hídricos são verificados na bacia, principalmente nos meses de verão, quando ocorrem as demandas para orizicultura.

A Bacia Hidrográfica dos rios Butuí-Icamaquã situa-se a nordeste do Estado do Rio Grande do Sul, entre as coordenadas geográficas 28°30' a 29°15' de latitude Sul e 54°40' a 56°30' de longitude Oeste. Abrange a Província Geomorfológica Planalto Meridional. Possui área de 8.144,81 Km², abrangendo municípios como Itacurubi, Itaqui e São Borja, com população estimada em 74.656 habitantes. Os principais cursos de água são os arroios Iquariçu, Piauí, Cabijú e os rios Butuí, Butuí-Mirim, Itacurumbi e Icamaquã. Os principais usos da água na bacia se destinam a dessedentação animal, abastecimento humano e irrigação.

A área de estudo também foi definida em função dos tipos de solos característicos da mesma. Como a área das três bacias é relativamente plana e as origens geológicas são relativamente homogêneas, em geral, não há grandes variações de solo, a não ser localmente. Os solos predominantes na área são os latossolos e neossolos, segundo o mapeamento da EMBRAPA, 2001 (Figura 08). Segundo a classificação adotada pela EMBRAPA, os latossolos são solos profundos, bem drenados, ácidos e de baixa fertilidade. Ocorrem, predominantemente, no norte do Estado, na área do Planalto Meridional. Os neossolos são solos pouco desenvolvidos e normalmente rasos, de formação muito recente, encontrados nas mais diversas condições de relevo e drenagem. Os neossolos ocorrem principalmente na região da campanha e podem ser caracterizados principalmente para essa região como solos litólicos. Existem ainda alguns outros tipos de solos, mas são de menor extensão e importância, do ponto de vista de caracterização mais geral das grandes manchas de solos na região.

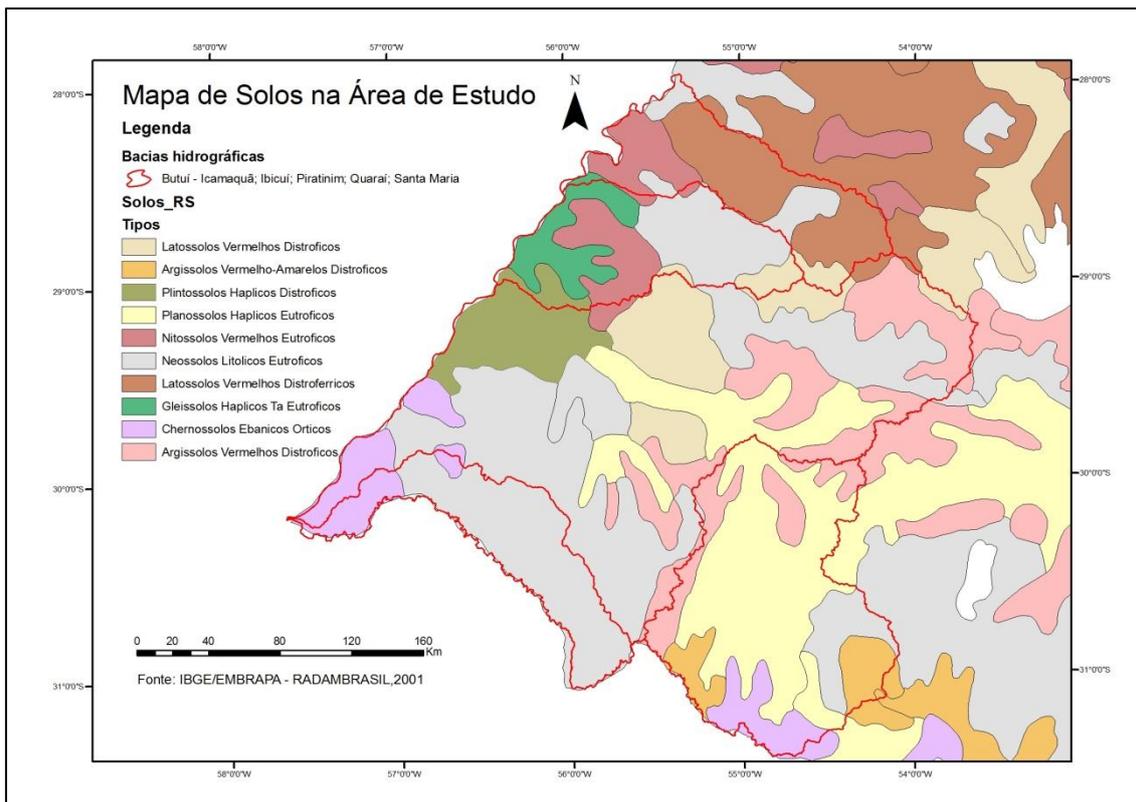


Figura 08 – Mapa de solos da área de estudo – (Fonte: IBGE/Embrapa, 2001)

3.1.2. O clima da região

Na região sul do Brasil as temperaturas e as precipitações acumuladas são características de climas subtropicais. As temperaturas têm variações sazonais grandes e as precipitações pluviais são relativamente bem distribuídas ao longo do ano. Em relação ao território gaúcho, as precipitações pluviais são maiores no norte, diminuindo em direção ao sul como mostra a Figura 09.

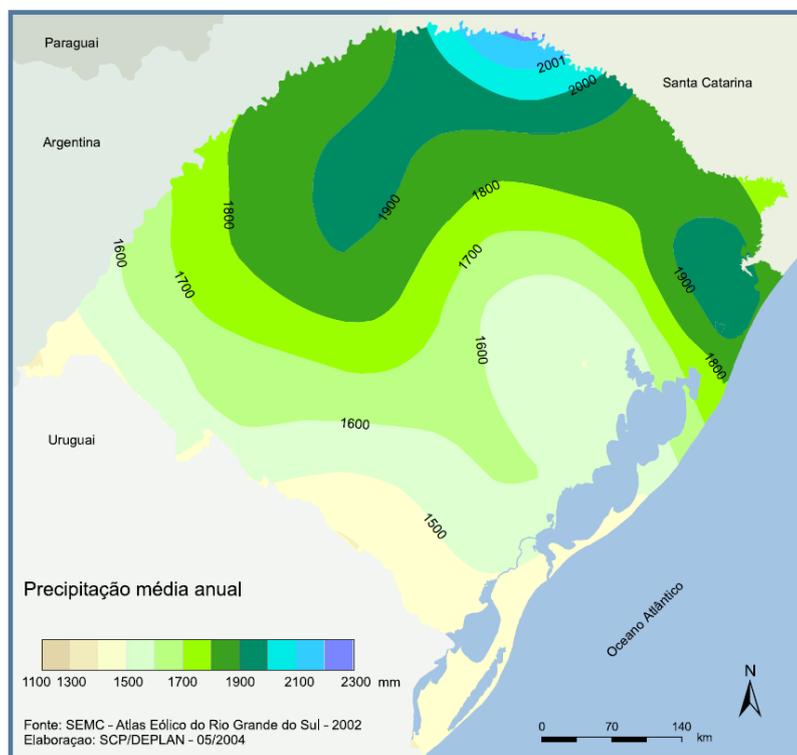


Figura 09 – Mapa de precipitação anual do RS. Fonte: SEPLAG, 2010

Segundo Vieira (1984), o clima predominante no Rio Grande do Sul é do tipo mesotérmico úmido, ou temperado, com certa uniformidade climática, que corresponde às áreas localizadas a sul do trópico de Capricórnio. Existem duas estações bem definidas: verão, que apresenta elevadas temperaturas, e inverno, com frio intenso. As chuvas no decorrer do ano são bem distribuídas.

A temperatura e a precipitação, segundo Vieira (1984), sofrem variações de acordo com as altitudes, as latitudes e a continentalidade, assim, as áreas de baixa elevação apresentam o clima mesotérmico brando e nas regiões de maiores elevações, predomina o clima mesotérmico médio. O clima mesotérmico no Estado pode-se caracterizar em dois tipos, uma área de verões e invernos brandos e outra de verões e invernos mais acentuados. Os fatores dinâmicos do clima no Estado são representados pela circulação atmosférica, especialmente as massas de ar dos anticlones atlântico e polar. A região escolhida caracteriza-se pela continentalidade o que acentua o rigor das temperaturas extremas e de algumas variações de precipitação ao longo do ano.

3.1.3. A precipitação pluvial mensal ocorrida em 2009

No Rio Grande do Sul, a precipitação no ano de 2009 mostrou grande variabilidade, sendo em geral mais intensa ao longo do mês de novembro e dezembro e menos intensa no mês de abril e junho, como observado nos mapas das Figuras 10 e 11.

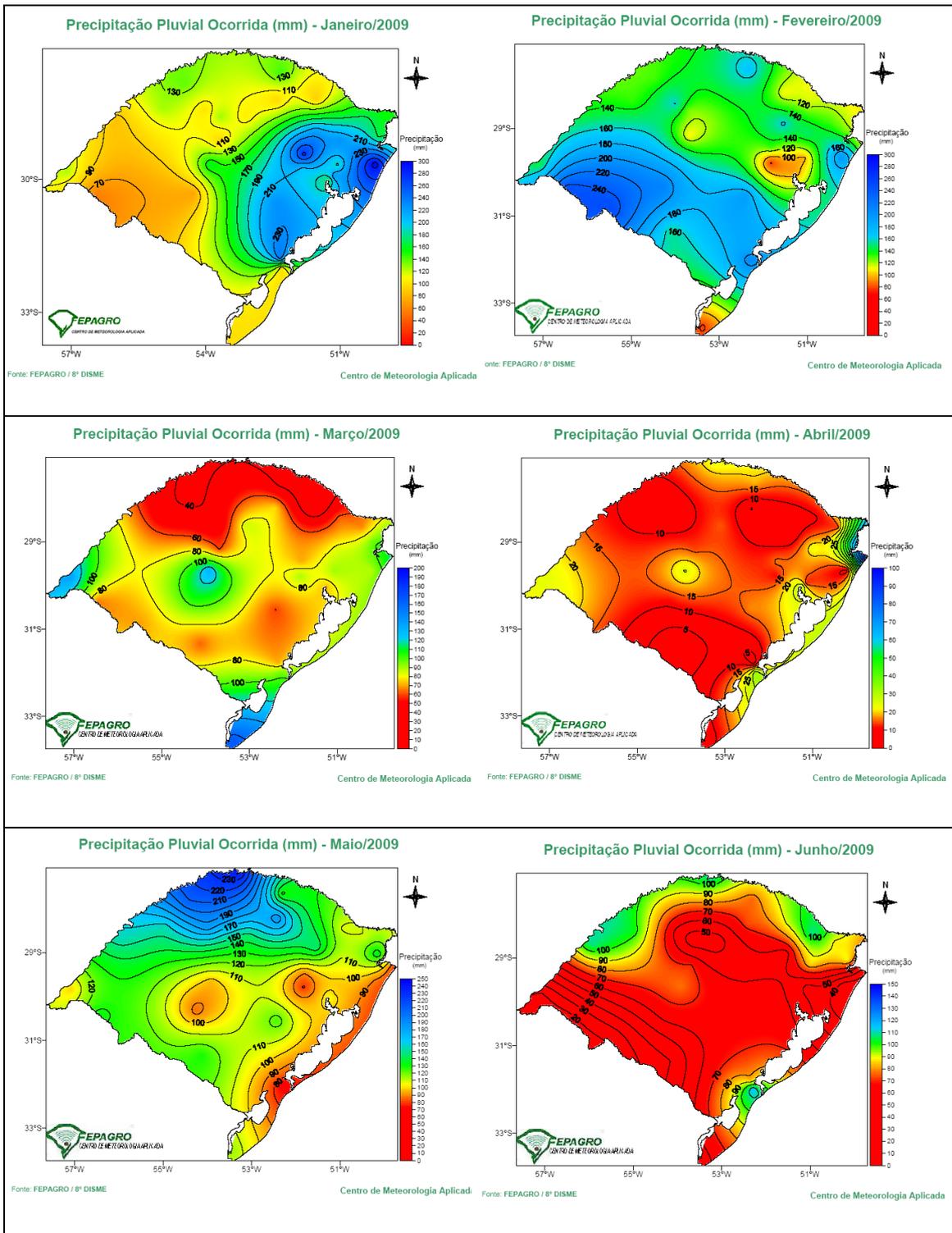


Figura 10 - Distribuição da precipitação mensal para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio e junho de 2009 no RS. Fonte: FEPAGRO

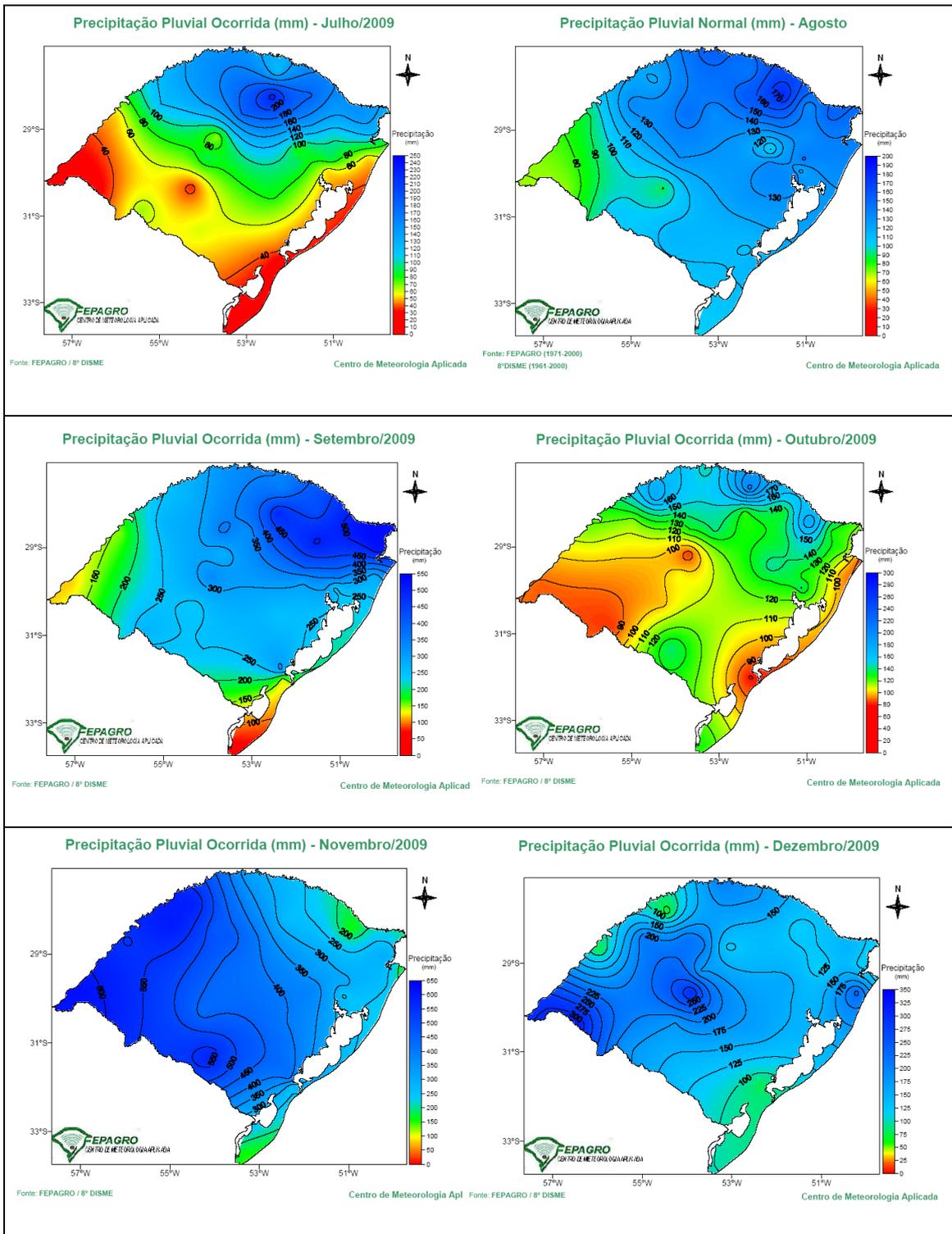


Figura 11 - Distribuição da precipitação mensal para os meses de julho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro de 2009 no RS. Fonte: Fepagro

3.2. Definição dos períodos de molhamento e ressecamento do solo

Devido à escassez de dados oriundos da medição direta de umidade do solo no Estado, optou-se por averiguar os padrões de precipitação pluvial para inferir sobre a situação de umidade do solo. Uma vez que a umidade do solo aumenta após ou durante o período de precipitação pluvial sobre determinado território, é possível relacionar um período de precipitação pluvial prolongado com a presença da umidade na área abrangida pela estação meteorológica, assim como é possível relacionar o período de escassez de precipitação pluvial com a diminuição de umidade no solo.

Para tanto, foram selecionadas 17 estações pluviométricas presentes à região de estudo, com informações diárias de precipitação pluvial (Figura 12 e Tabela 05). A partir destes dados foram definidos os períodos de maior (úmidos) e menor (secos) precipitação pluvial continuada.

Tabela 05 – Coordenadas geográficas das estações pluviométricas da área de estudo:

Latitude	Longitude	Nome	Codigo	Bacia	Responsavel	Município
-28,7028	-54,9244	BOSSOROCA FAZENDA	2850019	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	BOSSOROCA
-28,9897	-55,6742	SANTA CECÍLIA DO BUTUI	2855005	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	SÃO BORJA
-28,4056	-55,6103	SAMBURÁ	2855012	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	SÃO BORJA
-29,8786	-54,8253	CACEQUI	2954001	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	CACEQUI
-29,5069	-54,6775	JAGUARI	2954007	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	JAGUARI
-29,3514	-54,0669	QUEVEDOS	2954019	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	JÚLIO DE CASTILHOS
-29,5939	-55,4858	MANOEL VIANA	2955008	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	MANOEL VIANA
-29,7844	-55,7739	ALEGRETE PASSO DA	2955013	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ALEGRETE
-29,3078	-55,7089	CACHOEIRA	2955014	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ITAQUI
-29,6853	-55,1981	JACAQUA	2955016	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ALEGRETE
-29,1275	-56,5625	ITAQUI	2956005	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ITAQUI
-30,5144	-54,7703	GRANJA UMBU	3054016	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ROSÁRIO DO SUL
-30,2042	-55,4906	SÃO CARLOS	3055007	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	ROSÁRIO DO SUL
-30,5256	-56,1722	CATY BARRA DO	3056007	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	SANTANA DO LIVRAMENTO
-30,2133	-57,5533	QUARAÍ	3057002	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	BARRA DO QUARAÍ
-31,4375	-54,7117	SERRILHADA	3154008	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	DOM PEDRITO
-31,2753	-55,0372	TRÊS VENDAS	3155001	RIO URUGUAI	Agência Nacional de Águas	DOM PEDRITO

Fonte: ANA, 2010.

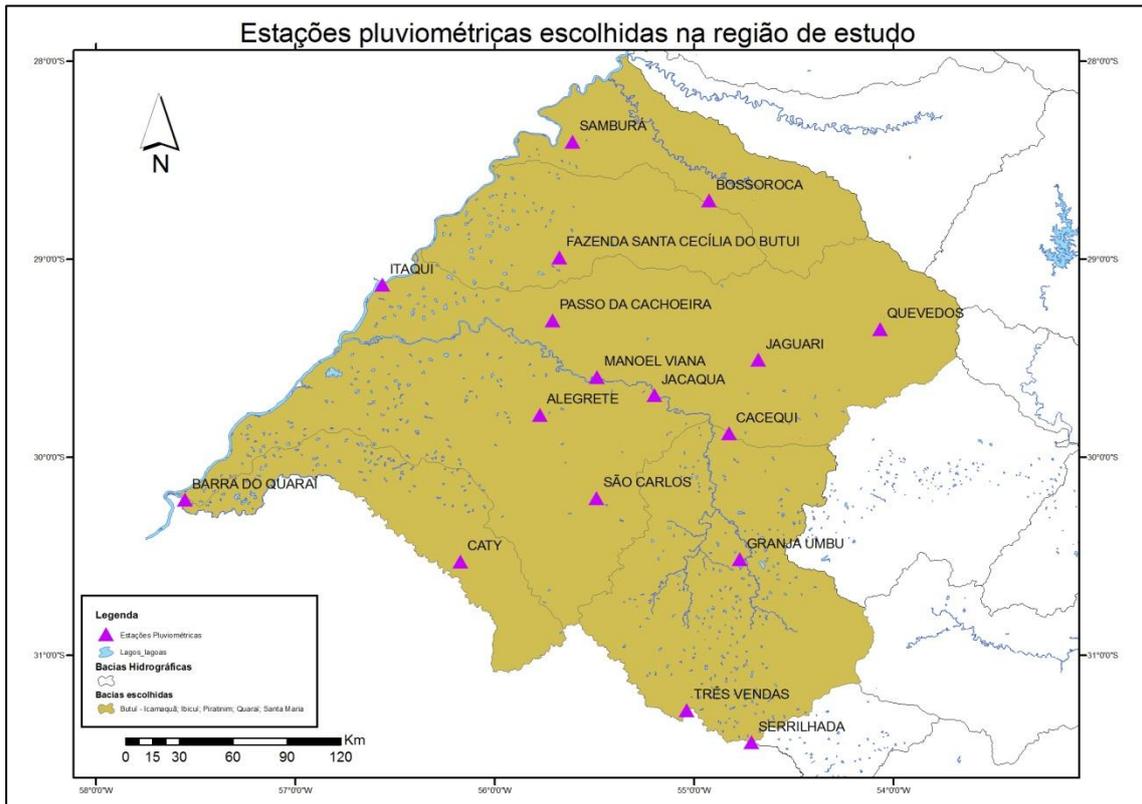


Figura 12 – Localização das estações pluviométricas utilizadas. Fonte: ANA (2010).

Tabela 06. Dados de precipitação pluvial de Abril. Fonte: ANA, 2010.

Código	2850019	2855005	2855012	2954001	2954007	2954019	2955008	2955013	2955014	2955016	2956005	3054016	3055007	3056007	3057002	3154008	3155001	3054007
Dia 01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0
Dia 04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	3,5	15,2	0	25,2	0	0,7	10,7
Dia 05	0	0	0	28,5	0	0	1,3	0	0	0	0	8,5	20,5	7,2	0	0	0	12,8
Dia 06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 19	0	0	0	0	0	0	0	14,2	0	0	0	0	0	0	5,3	0	0	2,1
Dia 20	14	14	9,1	8,5	14,6	16,2	6,7	0	12	0	42,1	2,1	1,5	10	0	0	0	0
Dia 21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	0
Dia 22	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Dia 23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,9	0	0	0
Dia 24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	0	0	0	0	0	0
Dia 27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dia 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 07. Dados de precipitação pluvial de Novembro. Fonte: ANA, 2010.

Código	2850019	2855005	2855012	2954001	2954007	2954019	2955008	2955013	2955014	2955016	2956005	3054016	3055007	3056007	3057002	3154008	3155001	3054007
Dia 01	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 02	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 03	0	0	0	135,4	0	sd	0,9	0	27,2	sd	0	sd	35,5	1,1	0	sd	sd	sd
Dia 04	11,2	15,8	0	0	133,2	sd	20,7	14,5	0	sd	4	sd	0	20	35,5	sd	sd	sd
Dia 05	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	42,2	100,7	23,3	sd	sd	sd
Dia 06	0	0	5,2	33,2	0	sd	4,7	3,5	43,4	sd	0	sd	23,9	26,5	75,3	sd	sd	sd
Dia 07	36	82,5	36,5	39	52,8	sd	52,8	67,5	9,2	sd	160	sd	20,7	22,6	0	sd	sd	sd
Dia 08	35	19,4	11,5	6,1	9,7	sd	8,1	0	0	sd	33,4	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 09	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	17,6	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 10	19,2	10,5	30,3	0	2,8	sd	17,8	18,7	39,1	sd	10	sd	10,5	4,4	0	sd	sd	sd
Dia 11	20,2	12,1	0	20	12	sd	9,8	0	0	sd	0	sd	1,7	0	0	sd	sd	sd
Dia 12	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 13	0,5	0	0	0	0,5	sd	0	62,5	35,3	sd	0	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 14	41	89,3	25,7	47,5	61,1	sd	50,5	0	35,4	sd	132,1	sd	0	62,4	0	sd	sd	sd
Dia 15	50	44,9	95,6	0	27,7	sd	18,5	5,3	30,5	sd	27,5	sd	80,7	14,3	41,5	sd	sd	sd
Dia 16	26,3	9,5	0	7,5	2,3	sd	2,5	0	0	sd	8,4	sd	12,2	3,9	0	sd	sd	sd
Dia 17	0	0	0	0	0	sd	0	56,3	0	sd	0	sd	47,7	0	0	sd	sd	sd
Dia 18	0	0	48,2	0	0	sd	0	0	53,7	sd	0	sd	0	19	0	sd	sd	sd
Dia 19	30,7	40,7	0	35,6	40,5	sd	45,9	0	0	sd	47,7	sd	140	48,5	0	sd	sd	sd
Dia 20	0,6	2,2	35,2	1,8	0,2	sd	0	0	11,2	sd	0	sd	0	6,4	0	sd	sd	sd
Dia 21	25	39,7	0	35,5	13,8	sd	12,9	0	0	sd	14,7	sd	85,1	0	41,5	sd	sd	sd
Dia 22	100,2	96,8	83,6	94,6	82,6	sd	67,7	126,9	130,1	sd	105	sd	0	147,2	21	sd	sd	sd
Dia 23	55	48,6	12,3	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	0	7	45,1	sd	sd	sd
Dia 24	22,3	29,5	75,6	55	36,5	sd	47,8	0	0	sd	45,5	sd	0	96	0	sd	sd	sd
Dia 25	6,1	9,5	0	0	0	sd	0	0	0	sd	3,1	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 26	0,9	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	0	sd	0	3,5	0	sd	sd	sd
Dia 27	0	0	0	0	0	sd	0	0	0	sd	4,4	sd	0	0	0	sd	sd	sd
Dia 28	0	0	9,8	0	0	sd	0	0	57,2	sd	0	sd	0	1,3		sd	sd	sd
Dia 29	36	4,6	0	19,2	7,7	sd	0	0	0	sd	47,1	sd	65,5	5,5	37,5	sd	sd	sd
Dia 30	68,2	78,9	49	56,8	69,7	sd	0	50,5	64,2	sd	65,5	sd	0	74,5	50	sd	sd	sd

Foram construídos mapas de isolinhas para a precipitação pluvial no sentido de compreender a distribuição das chuvas ao longo da área de estudo e poder comparar aos dados de umidade do solo. Considerando que as precipitações pluviais são bastante variadas na região, foram observados os comportamentos dos dados do sensor para os dias escolhidos. Uma vez que os fenômenos que causam a precipitação pluvial acontecem vinculados, na sua maior parte, aos movimentos de massas de ar sobre o território, isto faz com que as precipitações avancem ou recuem, principalmente de sudoeste para nordeste. Cabe salientar que os mapas de isolinhas foram construídos a partir dos dados das 17 estações escolhidas para o mês de abril e de 12 estações desse mesmo universo para o mês de novembro, em função de nem todas possuírem dados para esse mês. O método usado para se chegar aos mapas de distribuição espacial da precipitação pluvial foi o cálculo ponderado da distância inversa (sigla em inglês IDW), ferramenta presente no software ARCGIS 9.2. Foram estabelecidas classes representadas por cores onde o vermelho forte significa nenhuma ou pouca precipitação pluvial (índices próximos de 0) e o azul escuro significa máxima precipitação.

3.3 Imagens do sensor AMSR-E

Foram utilizados os dados provenientes do sensor AMSR-E na forma do produto L3.2, produto de umidade do solo tratado pelo algoritmo de Koike. A análise procedeu-se no sentido de detectar quais dias possuíam informações para comparação com os dados diários de precipitação pluvial da região. Foram escolhidos os dados dos dias que possuíam cobertura do sensor sobre todo o território gaúcho, pois como já mencionado anteriormente, em determinadas passagens do satélite em sentido descendente ou ascendente, a faixa de cobertura do sensor não alcançou todo o território, não gerando dados de umidade do solo.

Uma vez escolhidos os dias, os dados foram obtidos a partir de mecanismos de coleta do site http://nsidc.org/data/amsre/order_data.html da NASA, escolhidos de um calendário com disponibilidades.

Foram geradas imagens a partir da conversão dos dados de formato HDF para formato Geotiff no software ERDAS, versão 8.4. Em seguida foram carregadas pelo software ARCGIS, versão 9.1, para geração de mapas com representação cromática, onde para uma série de valores foram geradas paletas de gradientes de cores. Na classificação dos valores de umidade do solo se aplicou uma normalização para salientar as diferenças entre os valores de umidade e o resultado deste foi então utilizado para servir de base ao mapa de umidade do solo. Os valores foram representados por volumes de água no solo, ou seja, em m^3/m^{-3} .

Os dados de umidade do solo do sensor AMSR-E no nível 3.2 e as características de cada cena deste nível estão descritas na revisão bibliográfica e foram retiradas do manual disponibilizado pela NASA no seguinte site:

http://www.eorc.jaxa.jp/en/about/distribution/info/aqua/handbook_format.html

Foram utilizados dados do sensor resultantes na sua maioria de passagens ascendentes do satélite para poder considerar o território completo do Rio Grande do Sul. As passagens descendentes do satélite geraram poucas imagens da área estudo. Cabe salientar também que os horários de tomada dos dados são diferenciados para cada passagem, a ascensão do satélite acontece sobre a área de estudo às 6:00 horas da manhã e o movimento descendente provoca sua passagem às 14:00 horas. Os dados foram analisados para os pixels onde as estações pluviométricas se localizavam. Após foram comparados aos dados de umidade do solo e precipitação pluvial ocorrida nas estações e analisada a evolução e comportamento temporal da umidade, em função do molhamento do solo. Porém salienta-se aqui que a comparação se deu nos dias que possuíam dados do sensor.

Os dados gerados pelo sensor em estudo são organizados em arquivos georreferenciados e projetados esfericamente. Estão organizados em arquivos de formato raster e definem uma grade de pixels com 25 km de resolução espacial. Os mesmos arquivos foram dispostos junto aos limites de bacias para se poder observar a área de estudo.

A disponibilidade de dados aparece na Tabela 08 por dias dos meses escolhidos, indicando a obtenção em passagens ascendentes ou descendentes do satélite:

Tabela 08 – Disponibilidade de dados de umidade do solo para a área estudada.

Dia	Abril	Novembro
1	DESCENDENTE	ASCENDENTE
2	ASC/DES	DESCENDENTE
3	ASCENDENTE	ASC/DES
4	ASC/DES	DESCENDENTE
5	-	ASC/DES
6	DESCENDENTE	-
7	ASCENDENTE	ASC/DES
8	DESCENDENTE	ASCENDENTE
9	ASC/DES	DESCENDENTE
10	DESCENDENTE	ASC/DES
11	ASC/DES	DESCENDENTE
12	-	ASC/DES
13	ASC/DES	-
14	-	ASCENDENTE
15	DESCENDENTE	-
16	ASC/DES	DESCENDENTE
17	DESCENDENTE	ASCENDENTE
18	ASC/DES	DESCENDENTE
19	-	ASC/DES
20	ASC/DES	DESCENDENTE
21	-	ASC/DES
22	DESCENDENTE	-
23	ASCENDENTE	ASC/DES
24	DESCENDENTE	-
25	ASC/DES	DESCENDENTE
26	DESCENDENTE	ASC/DES
27	ASC/DES	DESCENDENTE
28	-	ASC/DES
29	ASCENDENTE	-
30	DESCENDENTE	ASC/DES

Fonte: NASA, 2011.

3.4 Relações entre a precipitação pluvial e a umidade do solo

As análises estatísticas foram realizadas considerando os dados existentes para os dias do mês em que o sensor passou sobre o território gaúcho.

Com a informação dos dias que possuíam dados de precipitação pluvial para cada estação pluviométrica procedeu-se à análise dos períodos secos e úmidos. Analisou-se cada estação no comportamento temporal de abril e novembro e depois se realizou uma comparação com os dados de umidade do solo. Como se pode observar nas tabelas 05 e 06, algumas estações não possuem dados coletados para alguns dias, principalmente no mês de novembro. Assim as análises estatísticas desconsideraram essas estações e consideraram as séries contínuas com os dados presentes.

Inicialmente foi feito o estudo do padrão de distribuição temporal da precipitação pluvial e da umidade do solo.

Para mês de abril, a análise estatística considerou todos os índices de precipitação pluvial, até porque os mesmos foram escassos e baixos. Na análise restaram apenas algumas estações com dados de precipitação pluvial que possuíam o dado equivalente para umidade do solo. Foi analisada a correlação entre a precipitação pluvial de um dia e a umidade do solo desse mesmo dia para cada estação e a correlação entre a precipitação pluvial de um dia com a variação da umidade da medida anterior à precipitação pluvial. Os dados do mês de novembro foram organizados em uma série única e contínua para os dias que ocorreu precipitação acima de 10 mm. Foram feitas análises simultâneas e com defasagem de um dia entre a precipitação e a umidade do solo. Foram feitas correlações com todos os dados, por estação e por extrato (intervalos de precipitação pluvial) e detectados os intervalos de precipitação pluvial.

Em ambos os meses foi realizada análise de correlação entre os dados de umidade do solo dos pixels sobre as estações que apresentaram padrões de precipitações pluviais similares para verificar a tendência do sensor em detectar a umidade de acordo com a precipitação pluvial. Foram analisados os períodos úmidos e secos em cada estação e no conjunto delas através da representação gráfica da distribuição temporal da precipitação pluvial. Foi analisado o mês de abril como o mês de menores precipitações (menos intensas e menos distribuídas) e o de novembro como de maiores precipitações (mais intensas e mais distribuídas).

Posteriormente, a análise abrangeu a distribuição espacial da precipitação pluvial e da umidade do solo.

Foi estabelecida a comparação da precipitação ocorrida em abril com as imagens geradas pelo sensor nos dias dessa ocorrência e nos dias anteriores à ocorrência, para verificar se a mesma exercia influência nos índices de umidade do solo. Já no mês de novembro foi estabelecida a comparação dos dias de pouca ou nenhuma precipitação pluvial, na maioria das estações com os dados do sensor tomados nesses dias e nos dias anteriores a este. Também se comparou a distribuição da precipitação ao longo da área de estudo com a distribuição da umidade do solo determinada pelo sensor. Pode-se observar no gráfico 23 que as estações escolhidas apresentam registro de precipitação para o mês de abril, de maneira concentrada nos dias 04 e 05 e depois nos dias 19 e 20. Assim foram tomadas para análise as imagens dos dias 02 ao dia 08 (excetuando os dias aonde não houve cobertura do sensor) para observar a resposta que a variação na umidade do solo oferecia aos momentos de precipitação pluvial. Também de se considerou o período de 17 a 24 de abril pela mesma razão. Já em novembro foram escolhidas as imagens que antecederam e as que prosseguiram ao longo dos dias de menor precipitação, uma vez que o objetivo neste mês de maiores precipitações foi verificar as variações para baixo dos valores de umidade do solo, em relação às precipitações ocorridas. Os períodos analisados são de 1 a 12, de 21 a 23 e de 27 a 30 de novembro.

Na análise para cada estação pluviométrica considerada acima, os aspectos físicos da região, principalmente as características dos solos, foram considerados, uma vez que permitem inferir várias causas de modificação do comportamento da umidade do solo. As informações das propriedades físicas (tais como porcentagem de areia, silte e argila) do solo foram coletadas da base de dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (*Food and Agriculture – FAO*) através do Sistema de Assimilação de Dados Terrestres (*Land Data Assimilation System - LDAS*), cujas informações podem ser extraídas do seguinte site: <http://ldas.gsfc.nasa.gov> (De Jeu, 2003) e cruzadas com as informações oriundas do levantamento de solos da EMBRAPA (2009).

4. Resultados e Discussão

4.1. Períodos secos e úmidos

De maneira geral, a maioria das estações pluviométricas escolhidas, de responsabilidade da ANA, apresentou padrões de distribuição das precipitações coerente com o observado pela FEPAGRO nas ocorrências mensais apresentadas nas Figuras 10 e 11. Nos meses de março, abril e junho, com ênfase para o mês de abril, as medições mostraram escassez de precipitação pluvial e para os meses de novembro e dezembro, abundância, sendo que nos demais meses houve precipitação pluvial intermediária, com maiores precipitações pluviais em algumas áreas específicas. Levando em conta a precipitação pluvial ocorrida na área de estudo e a falta de dados de grande parte das estações escolhidas em alguns meses, ficaram definidos os meses de abril e de novembro, quando se conseguiu estabelecer, com suficiência de dados, o padrão de precipitações para os menores e os maiores índices de precipitação pluvial, respectivamente.

Observou-se um padrão de distribuição da precipitação pluvial similar em grande parte das estações escolhidas, que pode ser observado pela distribuição mostrada nas Figuras 13 e 14, onde a ocorrência da precipitação é simbolizada por barras nos respectivos dias e distribuída ao longo dos meses escolhidos. Cabe salientar mais uma vez que os meses de setembro e dezembro não podem ser incluídos na análise, pois a maioria das estações não possuía dados.

No mês de abril foram observados dois períodos isolados com precipitação pluvial na maior parte das estações (dias 4 e 5 e dias 19 e 20), enquanto que no mês de novembro, a precipitação pluvial ocorreu na maior parte das estações pluviométricas e ao longo de quase todo o mês, como se pode observar nos gráficos das Figuras 24 e 25. Além da diferença na distribuição ao longo do mês, os valores de precipitação pluvial também foram muito distintos. Em abril, a maior precipitação pluvial foi de 42 mm em Cacequi e em novembro foram observados valores superiores a 100 mm em diversos dias e estações pluviométricas.

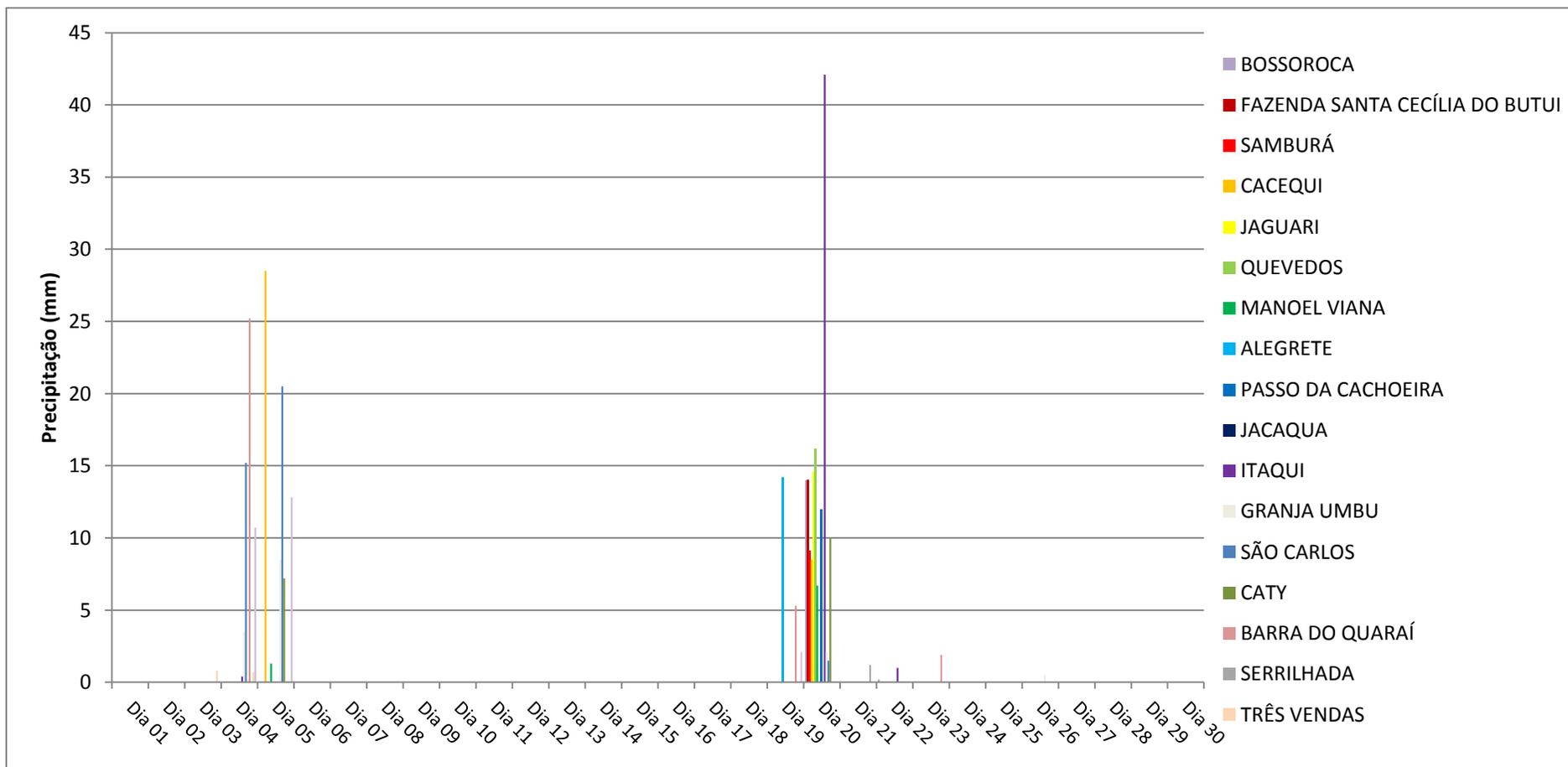


Figura 13 – Distribuição da precipitação pluvial ao longo do mês de abril de 2009, nas estações pluviométricas avaliadas. Fonte ANA, 2011.

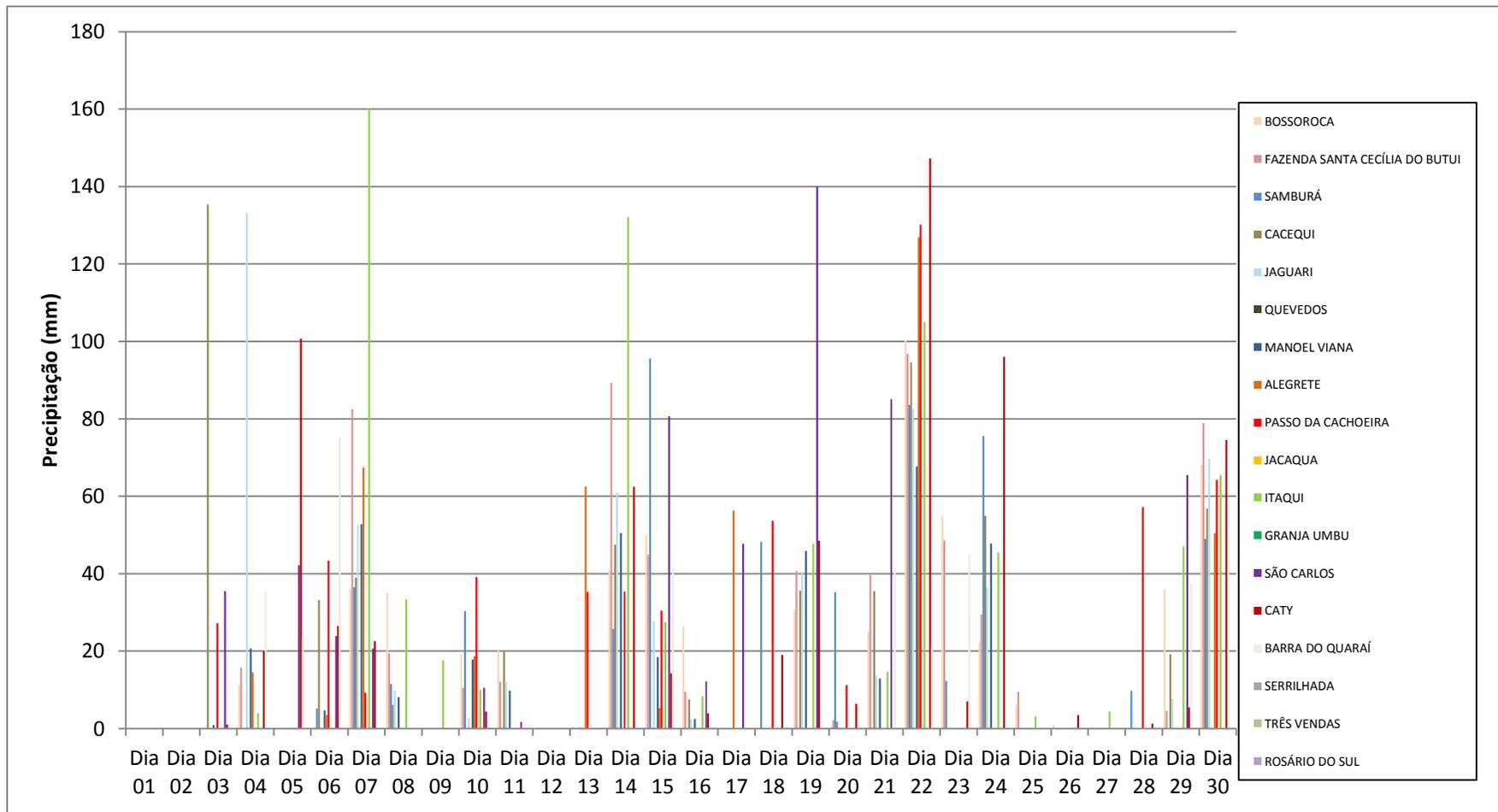


Figura 14 – Distribuição da precipitação pluvial ao longo do mês de novembro de 2009, nas estações pluviométricas avaliadas. Fonte ANA, 2011.

4.2. Padrão temporal da precipitação pluvial e da umidade do solo

Na análise dos dados para o mês de abril (mês com baixa precipitação pluvial) verificou-se que os valores de umidade do solo seguem padrões de comportamento que parecem não estar associadas às precipitações pluviais ocorridas no período. Observaram-se flutuações na umidade do solo (aumentos e diminuições), na maioria, não relacionadas à ocorrência de precipitação na estação (Figura 15).

A seguir são mostrados gráficos com a variação mensal da precipitação pluvial e da umidade para o mês de abril em cada estação pluviométrica considerada para o estudo:

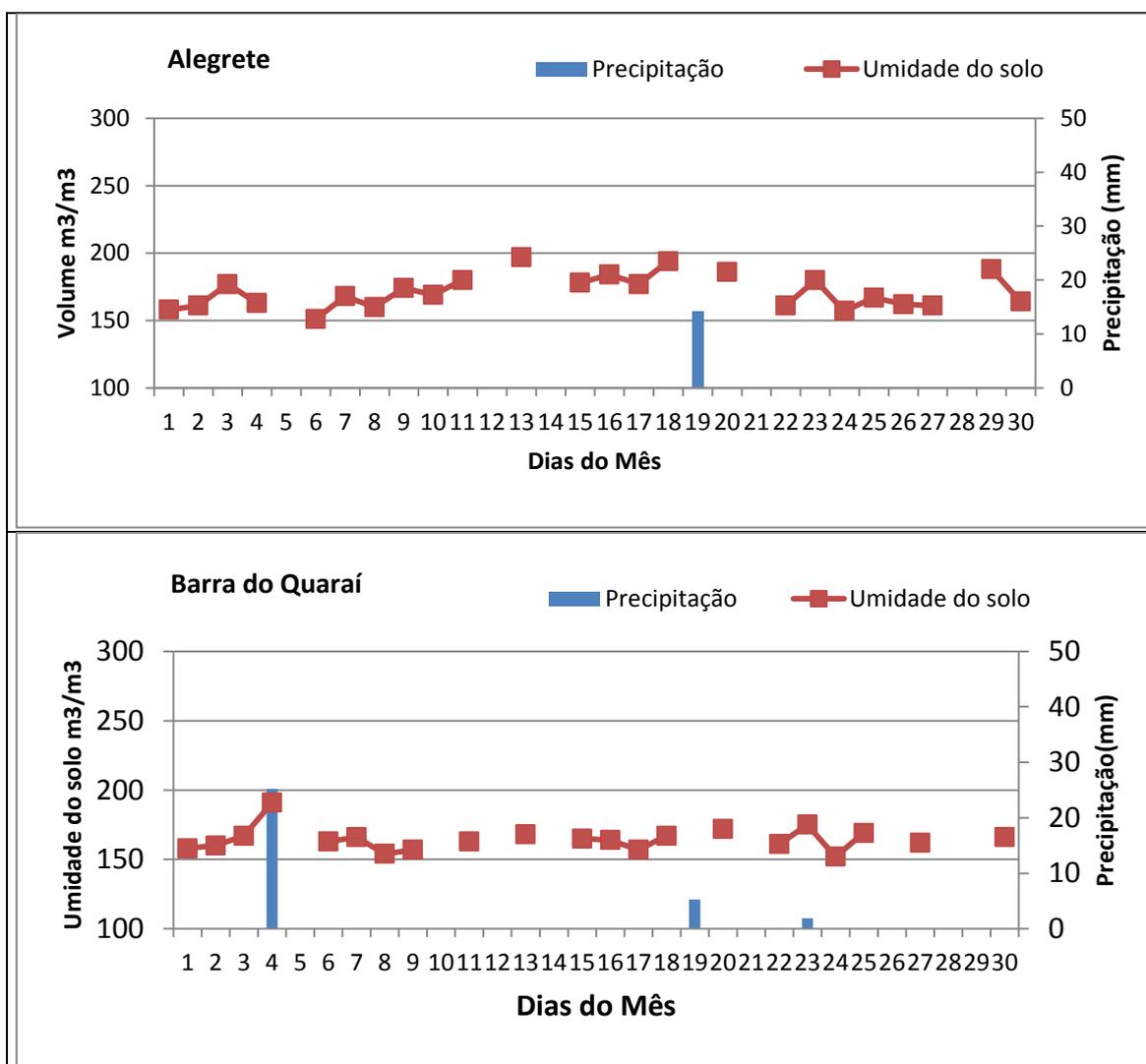
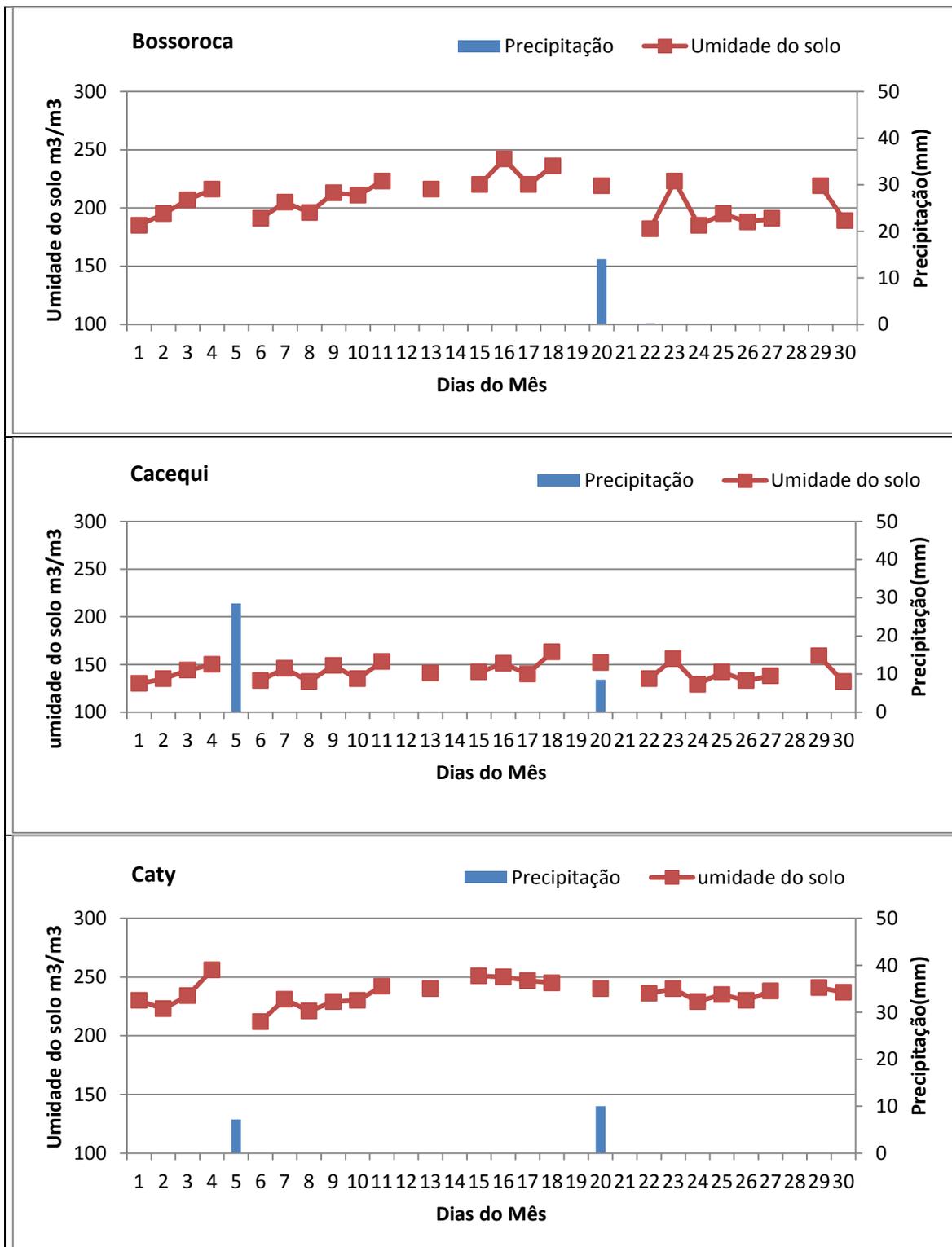
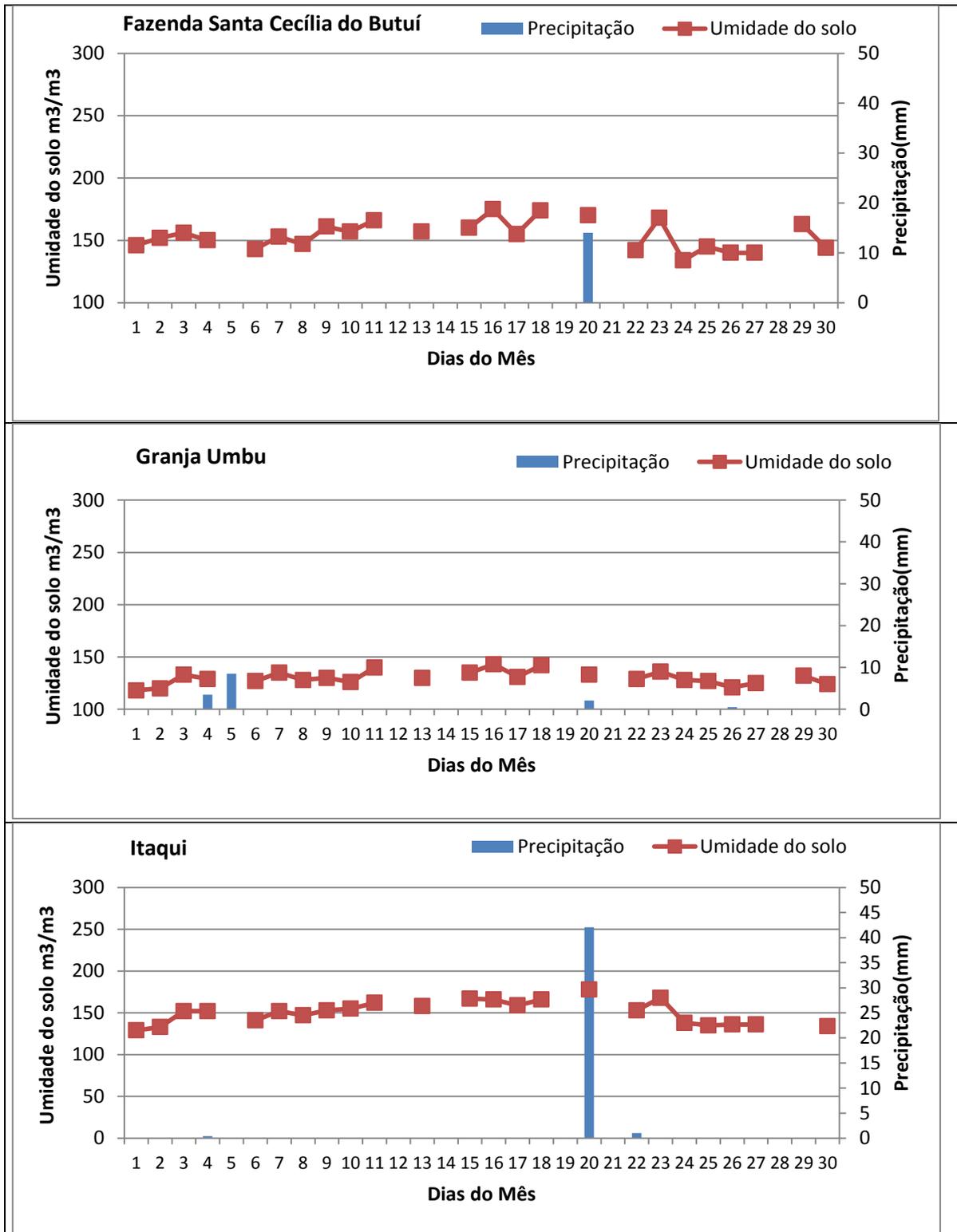


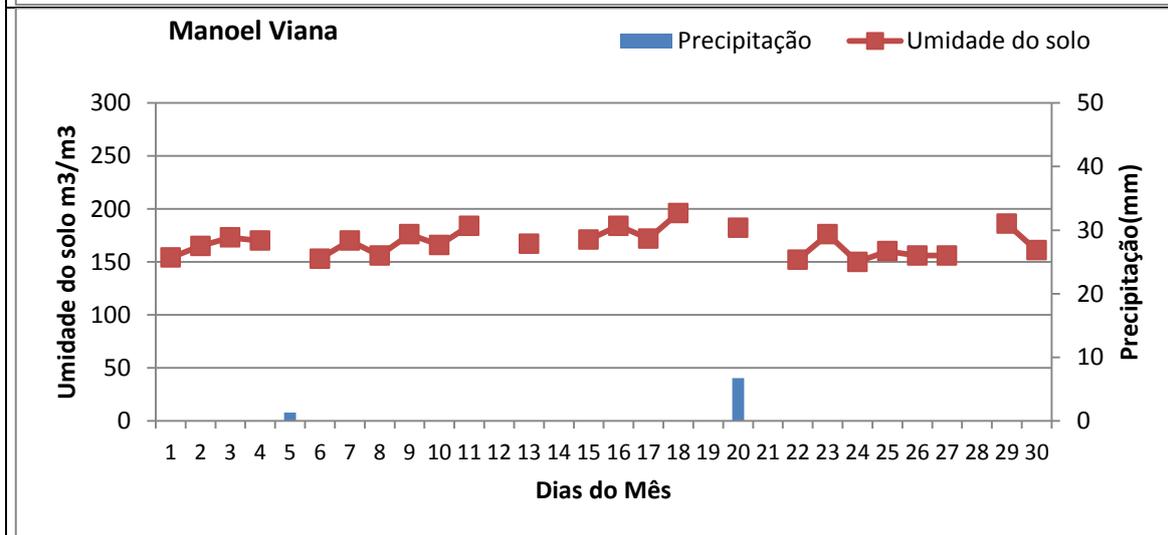
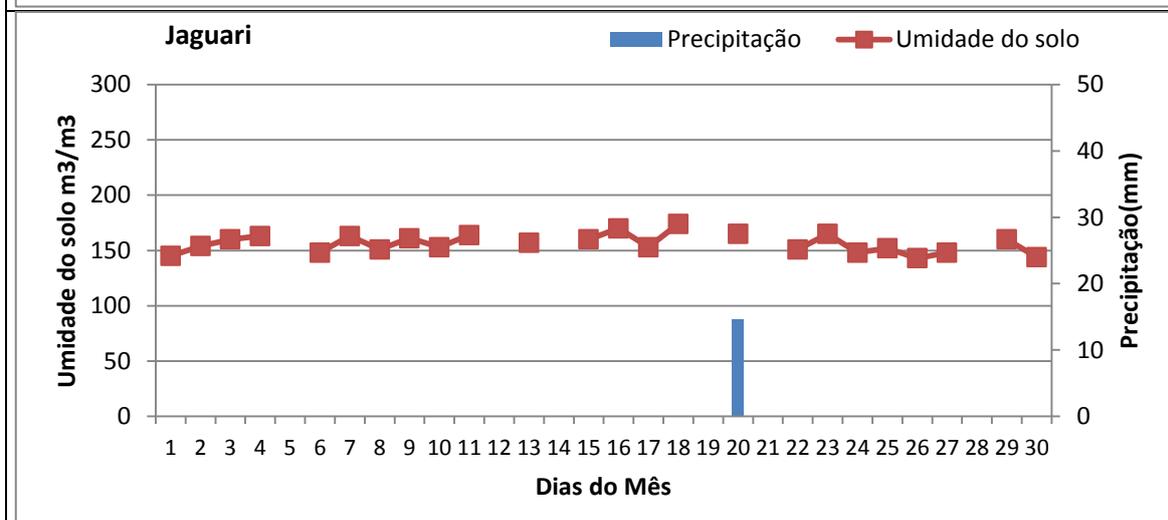
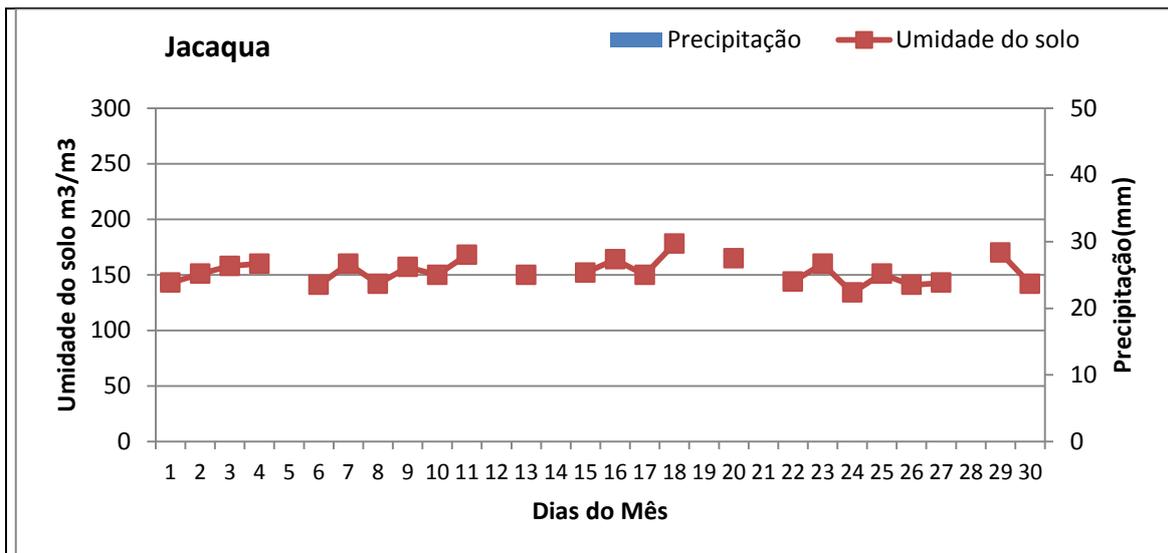
Figura 15 –Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



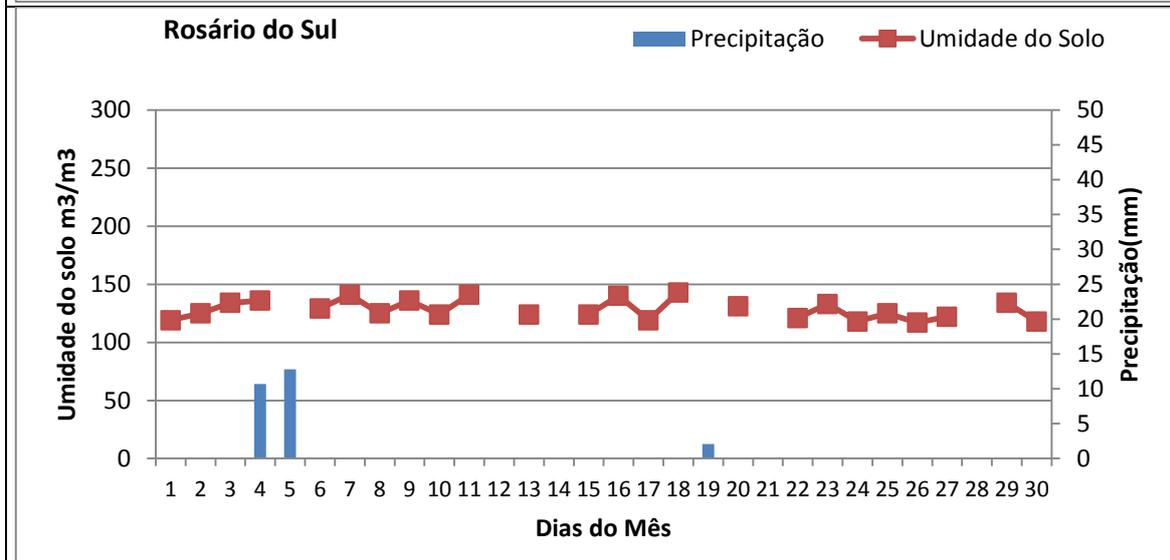
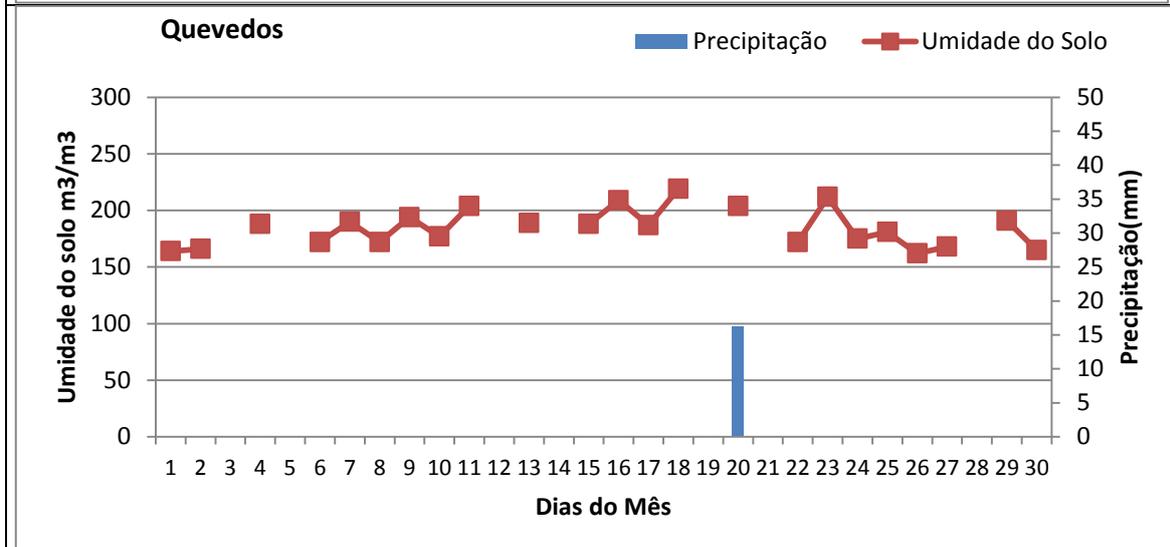
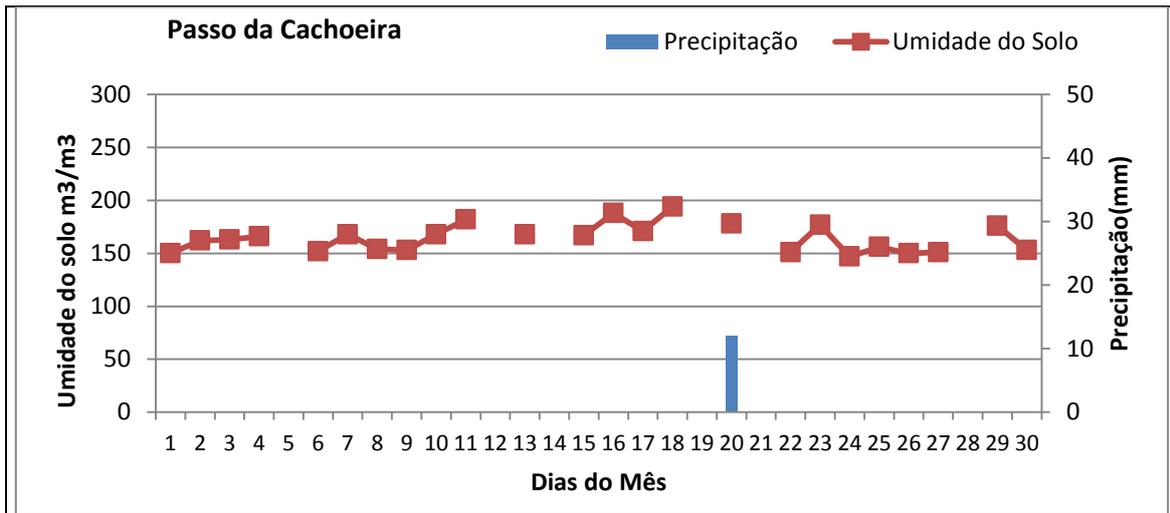
Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



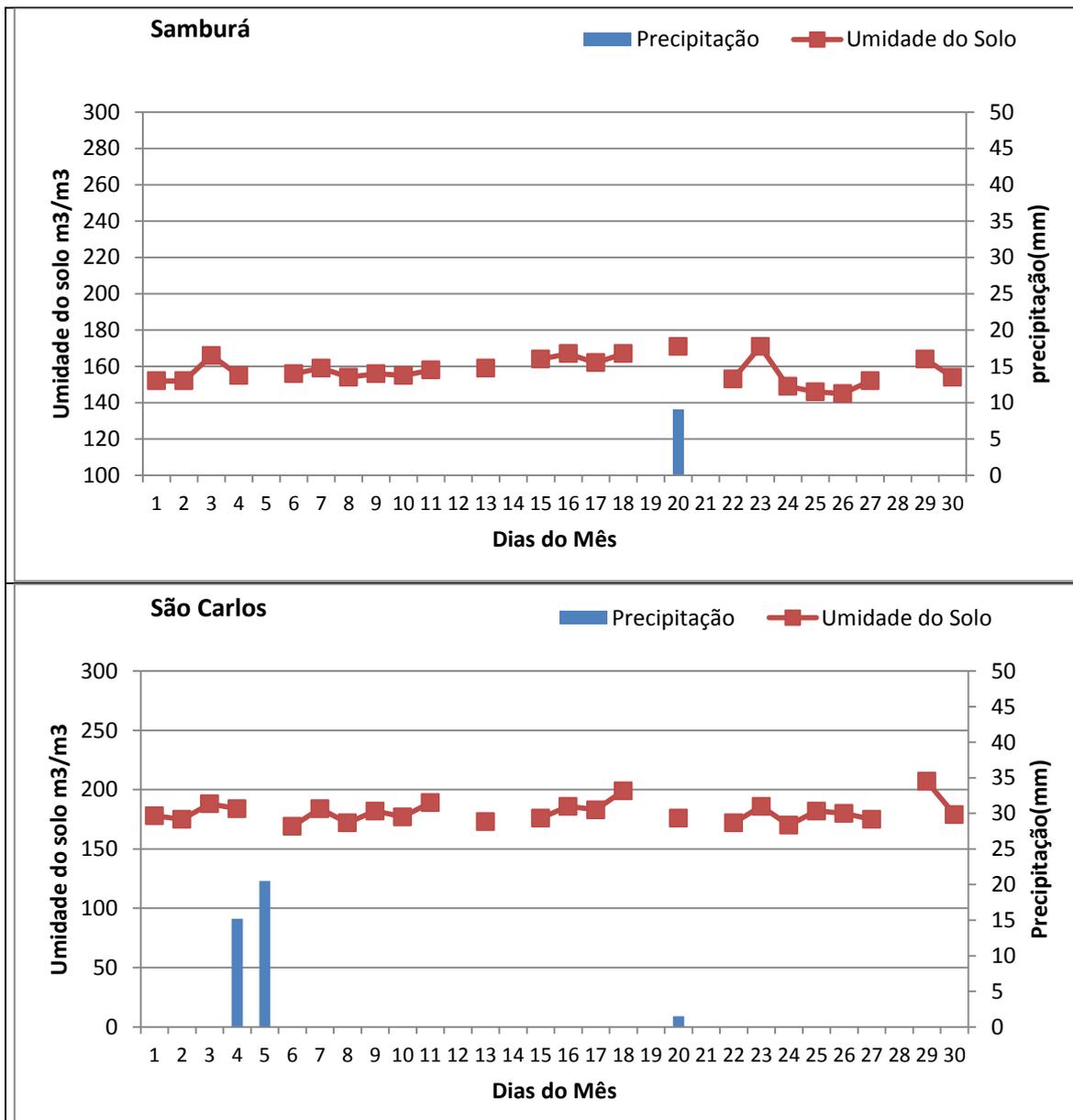
Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



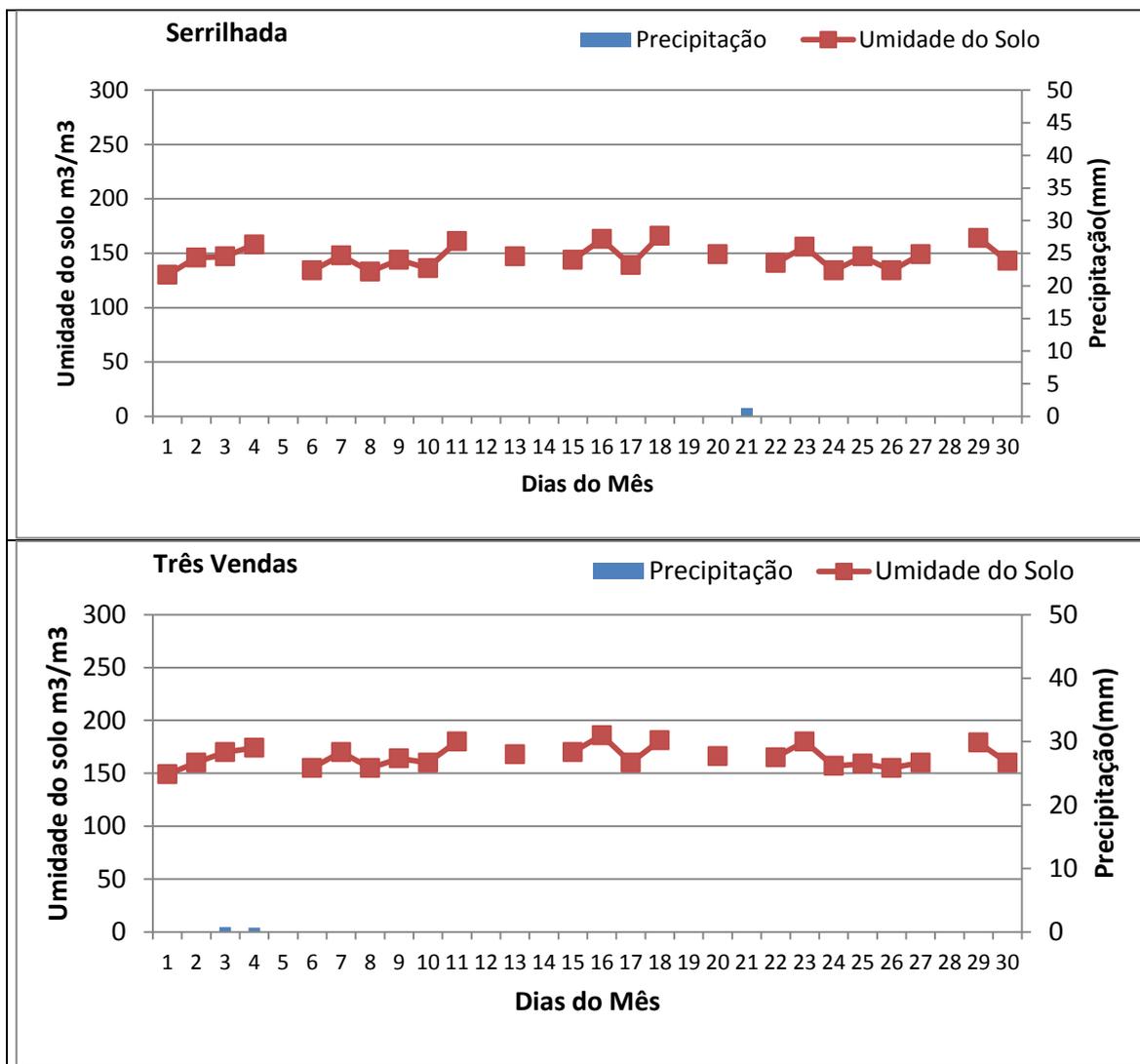
Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 15 – Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de abril nas estações pluviométricas analisadas.

As razões da baixa relação entre a precipitação pluvial e a umidade do solo em abril podem estar relacionadas a diversos fatores. Num período seco, com poucos eventos e baixos valores de precipitação pluvial ocorrida, a amostragem não pode ser considerada significativa, dado que os eventos de precipitação pluvial observados na estação pluviométrica podem ter sido localizados e não impactado a umidade do solo como um todo na área do pixel. O contrário também pode ter ocorrido, com a ocorrência de precipitações em áreas onde não havia estação pluviométrica. Também, o horário de ocorrência da precipitação pluvial pode introduzir ruído na relação, ou seja, a precipitação pluvial pode ter ocorrido após o horário de passagem do satélite. Além disso, é de se considerar também outras variáveis além da precipitação que influenciam a umidade do solo, uma vez que a primeira não ocorreu. As fontes alternativas como água subterrânea e a reservação de água, além de corpos hídricos fluentes nas áreas dos pixels analisados podem modificar e desvincular a umidade do solo percebida pelo sensor das precipitações pluviais ocorridas.

Na Figura 14 percebe-se, ainda, que em grande parte das estações pluviométricas avaliadas o padrão de umidade do solo detectado mostrou um padrão temporal similar. A análise de correlação entre a umidade do solo (Tabela 10), observada em estações que mantiveram correspondência de períodos de precipitação pluvial, apontou para um comportamento similar na umidade do solo.

Tabela 09 – Correlação entre as umidades do solo nas estações que possuíam padrões de precipitação similares:

Estações pluviométricas	Coefficiente de Correlação
Cacequi/Granja Umbu	0,7777826*
Jacaqua/Jaguari	0,9126727*
Rosário do Sul/São Carlos	0,6231668*
Granja Umbu/São Carlos	0,517655*
Cacequi/São Carlos	0,7968144*
Alegrete/Bossoroca	0,8319546*
Bossoroca/Fazenda	0,9292764*

*Coeficientes de correlação significativos a 99% de probabilidade pelo teste -t.

Observa-se que a correlação entre as umidades do solo detectadas pelo sensor, nas estações onde as precipitações ocorreram de maneira similar, é alta, principalmente entre Jacaqua e Jaguari; e Bossoroca e Fazenda, estações próximas. Isso demonstra uma regularidade do dado de umidade e, de certa forma, a detecção de um comportamento de resposta a um evento.

Nas Figuras 15 e 16 pode-se observar a relação consistente e com baixa dispersão dos dados de umidades do solo entre as estações que apresentaram as maiores correlações.

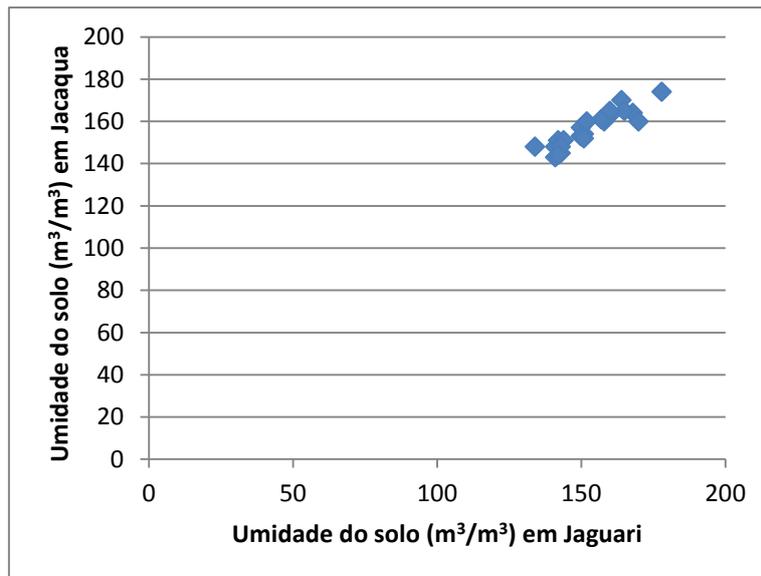


Figura 16 – Relação dos dados de umidade do solo observada sobre as de estações Jacaqua e Jaguari.

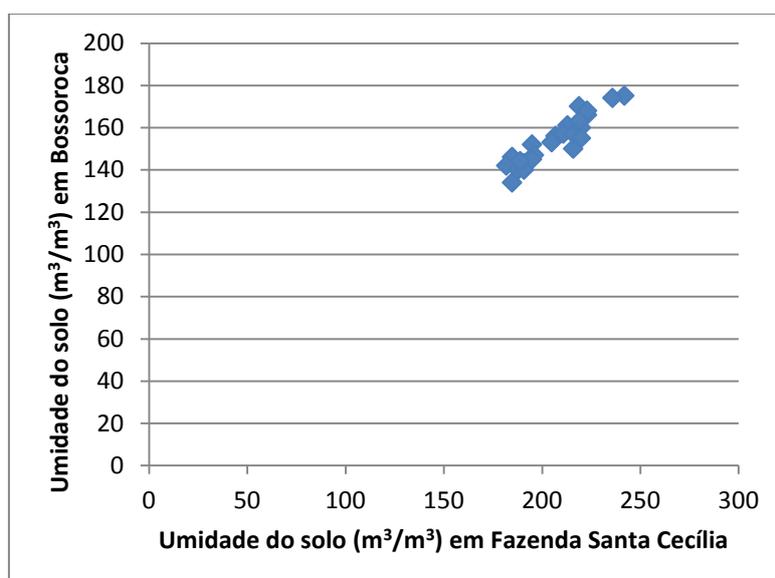


Figura 17 – Relação dos dados de umidade do solo observada sobre as de estações de Bossoroca e Fazenda Santa Cecília.

Desta forma, para o mês de abril, apesar da dificuldade de se estabelecer relação entre a precipitação pluvial ocorrida e a umidade do solo, em função da incerteza estatística estabelecida pela escassez de precipitação pluvial, foi possível verificar a existência de correlação entre a umidade do solo de estações onde houve comportamentos similares da precipitação pluvial.

Na Figura 18 a pode-se observar a variação da precipitação e da umidade para o mês de novembro, mês de maiores valores de precipitação, em cada estação pluviométrica considerada para o estudo (algumas estações não possuíam dados de umidade e por isso não foram consideradas).

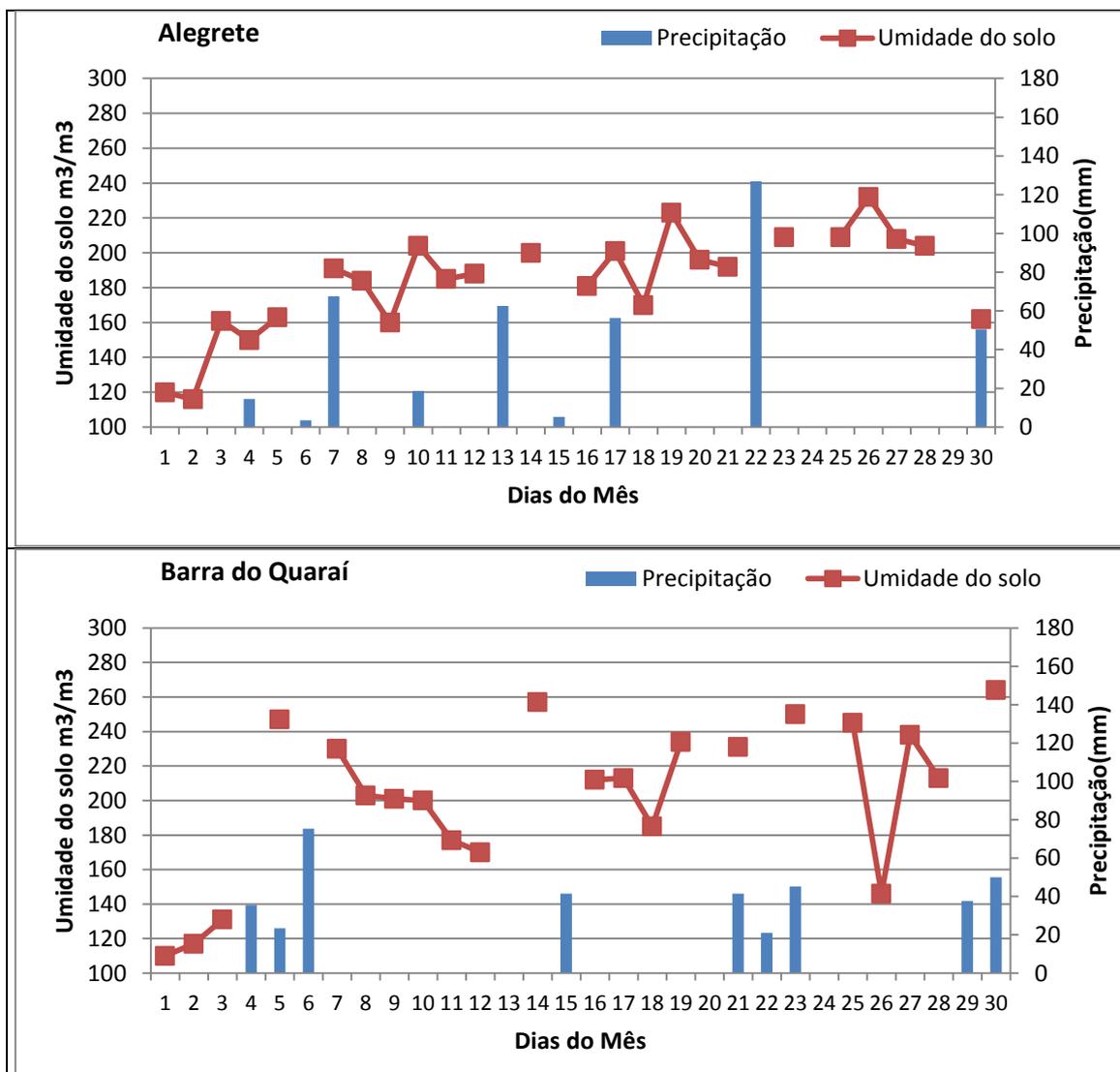
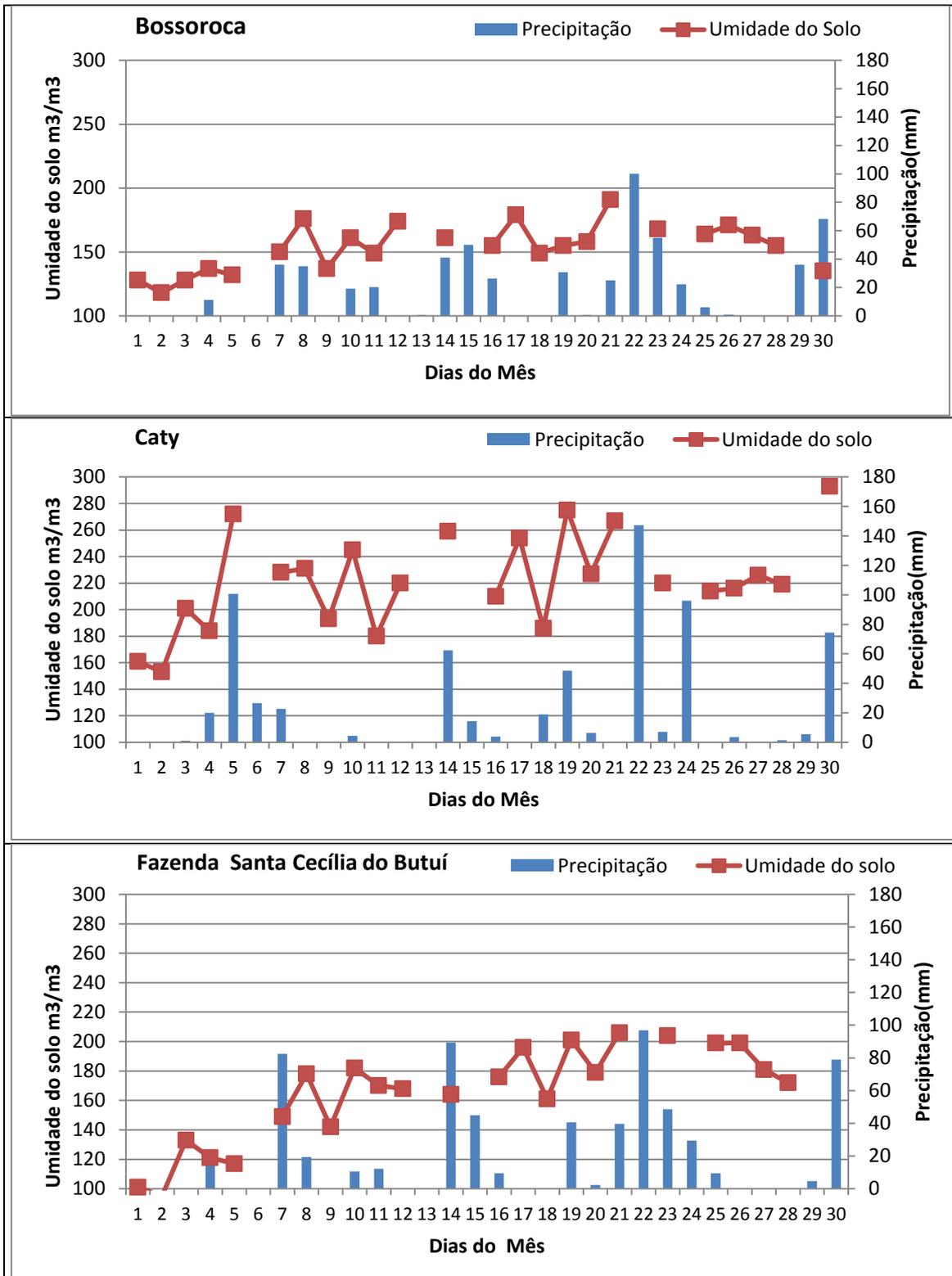
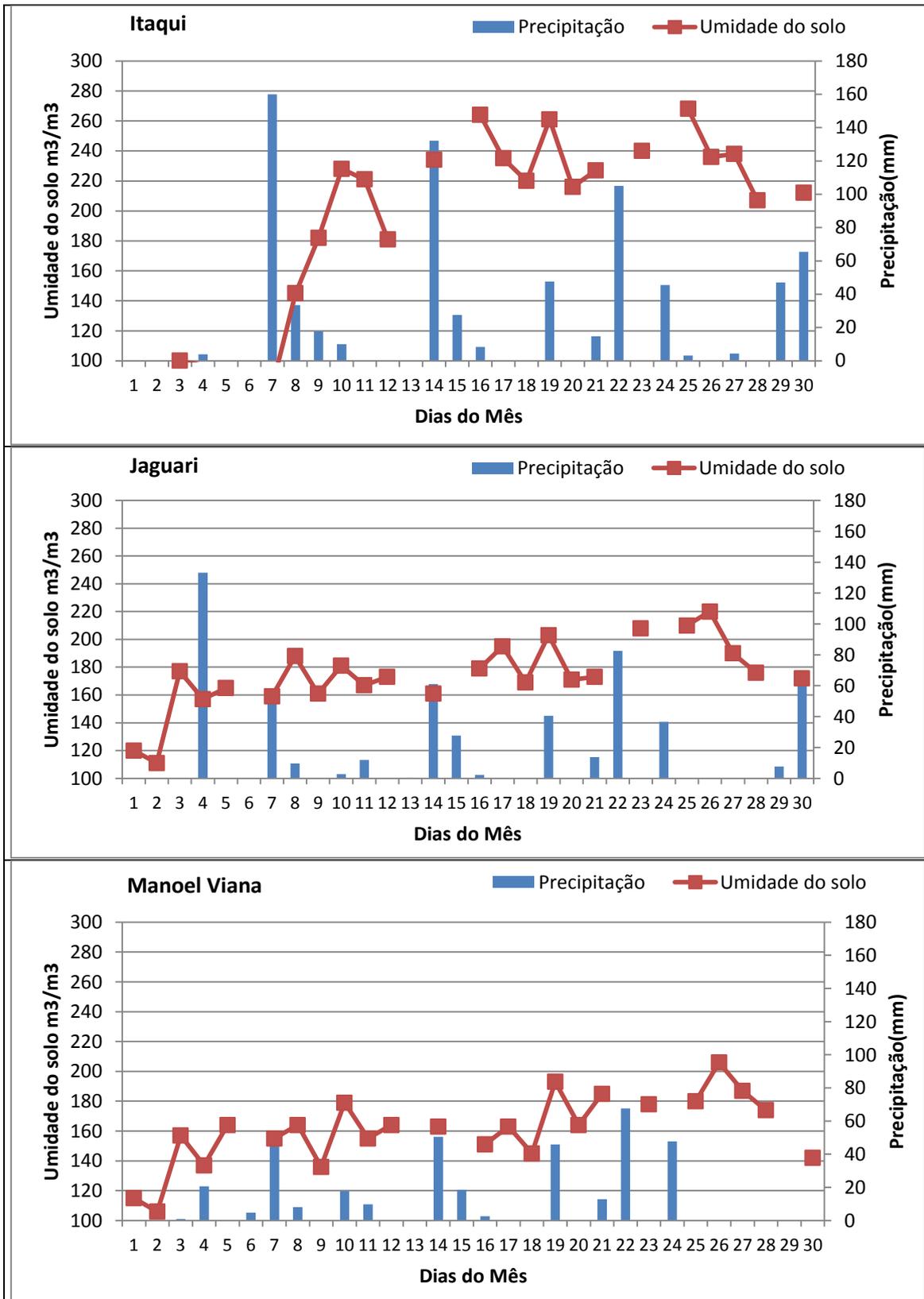


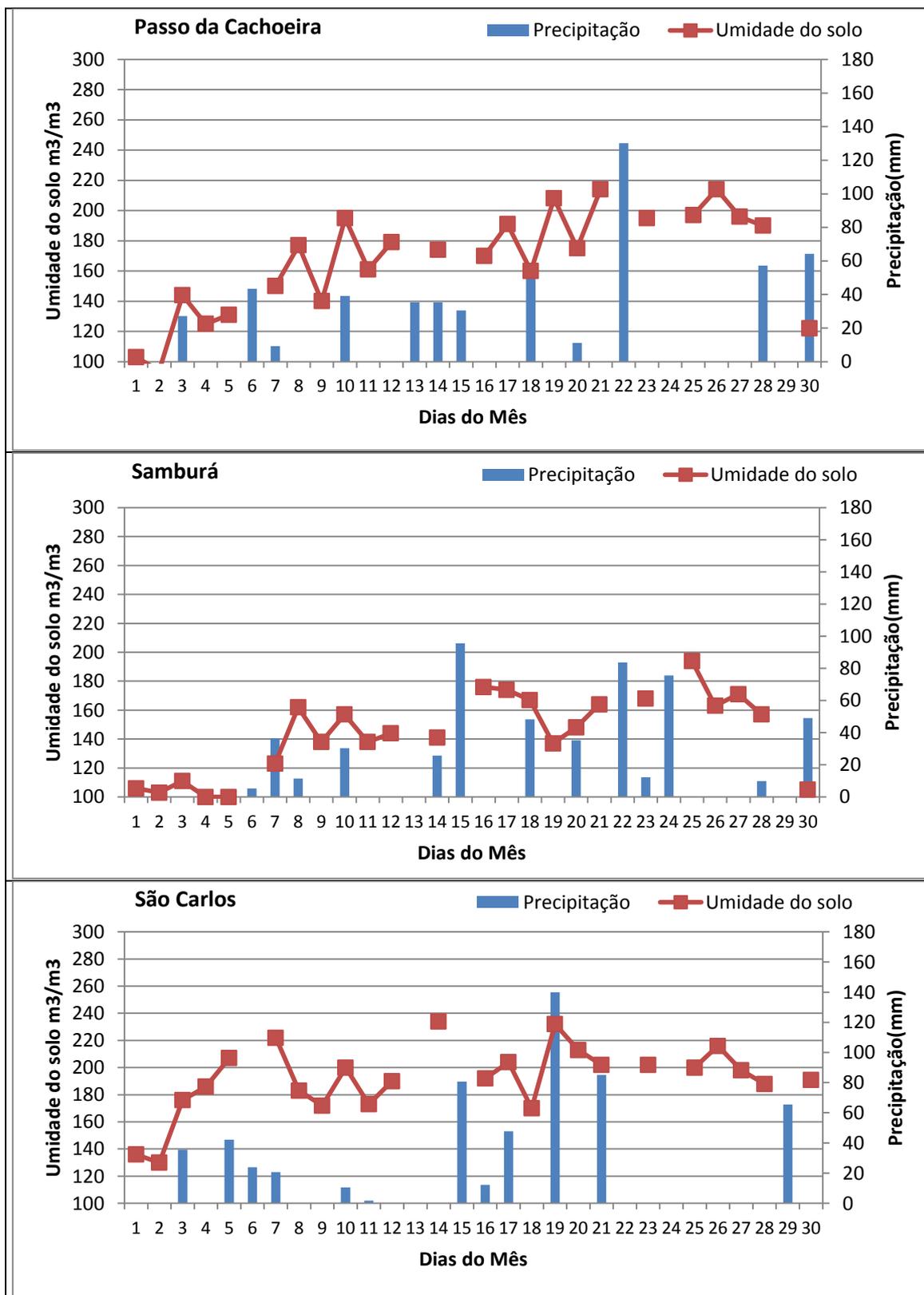
Figura 18 - Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de novembro nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 18 - Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de novembro nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 18 - Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de novembro nas estações pluviométricas analisadas.



Continuação da Figura 18 - Precipitação pluvial diária e umidade do solo ao longo do mês de novembro nas estações pluviométricas analisadas.

Para o mês de novembro observou-se precipitações pluviais mais intensas e constantes ao longo do período, em praticamente todas as estações. Observou-se ainda que a umidade do solo, em quase todas as estações, parece acompanhar ou dar resposta

às precipitações ocorridas. Na estação Caty, Fazenda Santa Cecília, Itaquí, Manoel Viana, Samburá e São Carlos, percebe-se, em geral, a elevação da umidade do solo após eventos de precipitação pluvial. Cabe ressaltar aqui que a análise estatística que se efetuou, comparou as precipitações e os índices de umidade do solo detectados no pixel sobre a área da estação pelo sensor AMSR-E.

Fazendo a correlação estatística considerando todo o conjunto dos dados obteve-se um coeficiente de correlação de 0,443. Este coeficiente não é significativo, porém é positivo, como seria esperado. Ainda se tem que considerar a situação de análise feita, pois a umidade responde mais lentamente aos momentos de precipitação pluvial. De maneira geral, observa-se que grande parte dos picos de umidade coincide com os picos de precipitação pluvial, porém com alguma defasagem temporal como, por exemplo, dia 26. Na maioria das estações pluviométricas como São Carlos, Jaguari, Manoel Viana, Passo da cachoeira, Alegrete e Bossoroca, o dia 26 mostra um aumento de umidade do solo, sendo que nessas estações a última precipitação ocorreu dias antes.

O comportamento temporal da umidade se mostrou mais contínuo e duradouro, no que se refere à manutenção de altos valores, apesar das precipitações não acompanharem essa manutenção.

A análise de correlação considerando os dados simultâneos e dados com defasagem de um dia em relação à umidade do solo são mostrados nas Tabelas 10 e 11. As análises do mês de novembro foram realizadas desconsiderando as precipitações de menos de 10 mm, uma vez que o mês apresentou alta pluviosidade. O que se constatou é que as correlações resultantes das análises simultâneas foram mais elevadas, especialmente quando se relacionou a precipitação pluvial ocorrida com a variação da umidade do solo.

Em 9 das 12 estações pluviométricas avaliadas foram observados coeficientes de correlação significativos superiores a 0,621 na análise simultânea. A quase totalidade das correlações mostraram sinal positivo, indicando que a ocorrência de eventos de precipitação pluvial causam variação positiva de umidade do solo, como esperado.

Tabela 10 – Correlação entre os dados de precipitação pluvial e umidade do solo coletados simultaneamente, em novembro de 2009

Estações pluviométricas	Coeficiente de correlação	
	Umidade do solo	Varição da umidade do solo
Alegrete	0,305	-0,294
Barra do Quaraí	0,341	-0,830*
Bossoroca	-0,096	0,621*
Cacequi	0,125	0,801*
Caty	0,819	0,833*
Fazenda Santa Cecília do Butuí	-0,365	0,712*
Itaqui	-0,450	0,377
Jaguari	-0,479	0,862*
Manoel Viana	0,056	0,944*
Passo da Cachoeira	-0,268	0,855*
Samburá	-0,543	0,651*
São Carlos	0,608	0,086

*Coeficiente de correlação significativo a 99% de probabilidade pelo teste - t

Tabela 11 – Correlação entre os dados de precipitação pluvial e umidade do solo com defasagem de 1 dia, em novembro de 2009.

Estações pluviométricas	Coeficiente de correlação	
	Umidade do solo	Varição da umidade do solo
Alegrete	0,288	0,339
Barra do Quaraí	-0,445	-0,310
Bossoroca	0,472	-0,419
Cacequi	-0,519	-0,070
Caty	-0,590	-0,264
Fazenda Santa Cecília do Butuí	-0,188	-0,752
Itaqui	-0,298	-0,727
Jaguari	-0,340	-0,741
Manoel Viana	0,204	0,037
Passo da Cachoeira	-0,465	-0,159
Samburá	0,211	-0,776
São Carlos	0,100	-0,625

O que se constata na análise dos dados de umidade com defasagem em relação à precipitação é que o coeficiente de correlação diminui em relação à análise dos dados simultâneos, assumindo valores negativos em quase todas as estações pluviométricas. Isso, em parte pode ser explicado pela hora da coleta do sensor que na maior parte dos dados utilizados foi no início da manhã e início da tarde, fazendo com que a ocorrência da precipitação nem sempre coincida com a coleta da umidade. A sensibilidade do sensor e o algoritmo utilizado para filtrar a influência da própria precipitação pluvial sobre o sinal estimado pode alterar a resposta da umidade do solo à precipitação pluvial do dia anterior (NJOKU,2008).

A análise dos dados de precipitação relacionados ao sinal da variação da umidade do solo (positivo para valores maiores e negativos para valores menores) é apresentada na Tabela 12. Verificou-se que em algumas estações, como Barra do Quaraí, Alegrete, Fazenda Santa Cecília do Butuí, Itaqui, Samburá e São Carlos, a maior parte das vezes que ocorreu precipitação houve um incremento da umidade do solo.

Tabela 12 – Estatísticas do número de eventos de precipitação que causou variações positivas na umidade do solo, em novembro de 2009.

Estação	Variações positivas	Total de variações	Porcentagem
Alegrete	3	5	60,0
Barra do Quaraí	4	4	100,0
Bossoroca	5	11	45,5
Cacequi	4	11	36,4
Caty	5	7	71,4
Fazenda	6	7	85,7
Itaqui	7	12	58,3
Jaguari	2	8	25,0
Manoel Viana	3	7	42,9
Passo da Cachoeira	1	7	14,3
Samburá	5	9	55,6
São Carlos	6	7	85,7

Analisando a correlação do índice de umidade do solo entre as estações pluviométricas que mantinham correspondência aos períodos de precipitação pluvial em novembro (Tabela 13), percebe-se que a correlação é maior que nas análises efetuadas entre a precipitação pluvial e a umidade do solo. Novamente, da mesma forma como foi mencionado nas análises para o mês de abril, estes altos coeficientes de correlação evidenciam a regularidade do dado estimado pelo sensor.

Tabela 13 – Coeficiente de correlação entre a umidade do solo em estações pluviométricas com padrões de precipitação pluvial similares no mês de novembro.

Estações pluviométricas	Coeficiente de correlação
Manoel Viana/Passo da Cachoeira	0,920*
Jaguari/Manoel Viana	0,870*
São Carlos/Caty	0,755*
Alegrete/São Carlos	0,810*

*Coeficiente de correlação significativo a 99% de probabilidade pelo teste - t

Na Figura 19 é possível analisar a dispersão dos valores estimados de umidade do solo entre as estações que constam na Tabela 13.

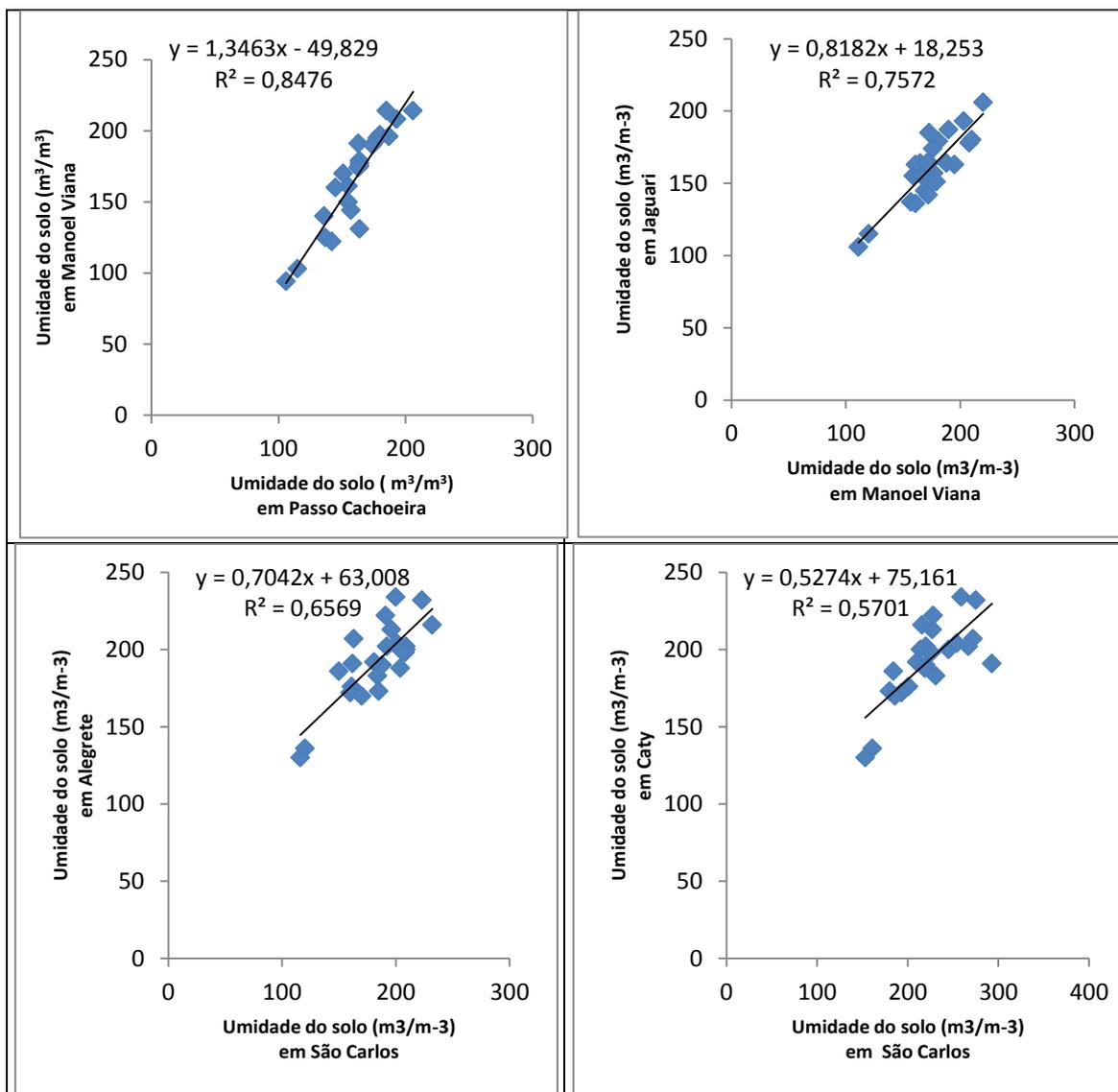


Figura 19 – Relação entre a umidade do solo de estações próximas entre si e similares nos padrões de precipitação.

Em resumo a análise temporal pode dar uma boa idéia da proximidade de comportamento da umidade do solo estimada pelo sensor AMSR-E, quando analisada num conjunto de dados e considerando os fatores intervenientes sobre a relação entre a umidade real e a estimada.

A análise temporal do sensor AMSR-E tem sido realizada em diversas áreas do Globo e em diversos períodos do ano por diferentes pesquisadores (LOEW et al, 2009) e apresentou relações diretas ou indiretas sobre as áreas analisadas. Os pesquisadores DRAPER et al (2007), compararam dados de umidade do solo resultantes da banda C e da banda X com dados de precipitação pluvial e dados de um modelo de umidade do solo baseado na precipitação pluvial registrada em uma região da Austrália. Os autores concluíram que a banda C se apresenta com a maior correlação com os dados de precipitação pluvial, uma vez que a umidade do solo do modelo é inicializada utilizando precipitação pluvial antecedente às observações do sensor. Na comparação espacial da umidade do solo do modelo chamado LAPS com dados do AMSR-E indica que há

menos detalhe espacial na umidade do solo do LAPS do que nas áreas de sensoriamento remoto (mais do que pode ser atribuído às suas diferentes resoluções). A umidade do solo do LAPS mostrou duas regiões úmidas (não mostrado por AMSR-E) no norte da Austrália Ocidental e a oeste de Rainband ao sul de Queensland, que não correspondem à precipitação pluvial do dia anterior, mas sim a pesada precipitação dois dias antes. Na comparação dos valores estatísticos de cada dado, verifica-se a correspondência.

O estudo em questão concluiu que os produtos da umidade do solo, derivados do brilho de temperatura das bandas C e X do sensor AMSR E são realistas, tanto em relação às outras estimativas da umidade do solo, e até mais realistas do que os campos de umidade do solo atualmente utilizado para inicializar o modelo LAPS. Os coeficientes de correlação foram respectivamente, 0,79 e 0,77 para as bandas C e X. Em contraste, a umidade do solo derivada da NASA da banda X, da temperatura de brilho do AMSR E não verifica, assim, e não oferece qualquer melhoria em relação à umidade do solo LAPS, dado que as correlações foram inferiores a 0,58.

4.3. Distribuição espacial da precipitação pluvial e a umidade do solo

Neste item são apresentados os mapas da distribuição da precipitação pluvial ocorrida na área de estudo nos meses citados anteriormente (períodos secos e úmidos) como base para entender a distribuição espacial deste elemento e relacioná-la aos dados de umidade do solo do sensor AMSR-E. Nos mapas, a precipitação pluvial está associada a cores, onde os tons próximos do azul simbolizam as maiores precipitações pluviais e os próximos do vermelho, as menores.

Os mapas de umidade do solo mostrados neste capítulo são oriundos da informação gerada pelo sensor ASMSR-E, retrabalhada pela aplicação dos algoritmos e filtros que consideraram padrões mundiais de vegetação, padrões de relevo (NJOKU, 2008) e representam as quantidades de umidade presente na superfície do solo, a qual está simbolizada por uma variação de cores que vai do vermelho, que representa solo mais seco, até o azul, solo mais úmido, passando por cores amareladas e azuis claras.

Na figura 20 é mostrado o total de precipitação pluvial ocorrido no mês de abril. Verifica-se que a pouca precipitação que ocorreu no mês ficou restrita às áreas a oeste da região e às áreas das estações São Carlos e Cacequi. Nas estações de Jacaqua, de Três Vendas e Serrilhada praticamente não houve precipitação, salientando assim a provável baixa umidade do solo para essas áreas neste mês.

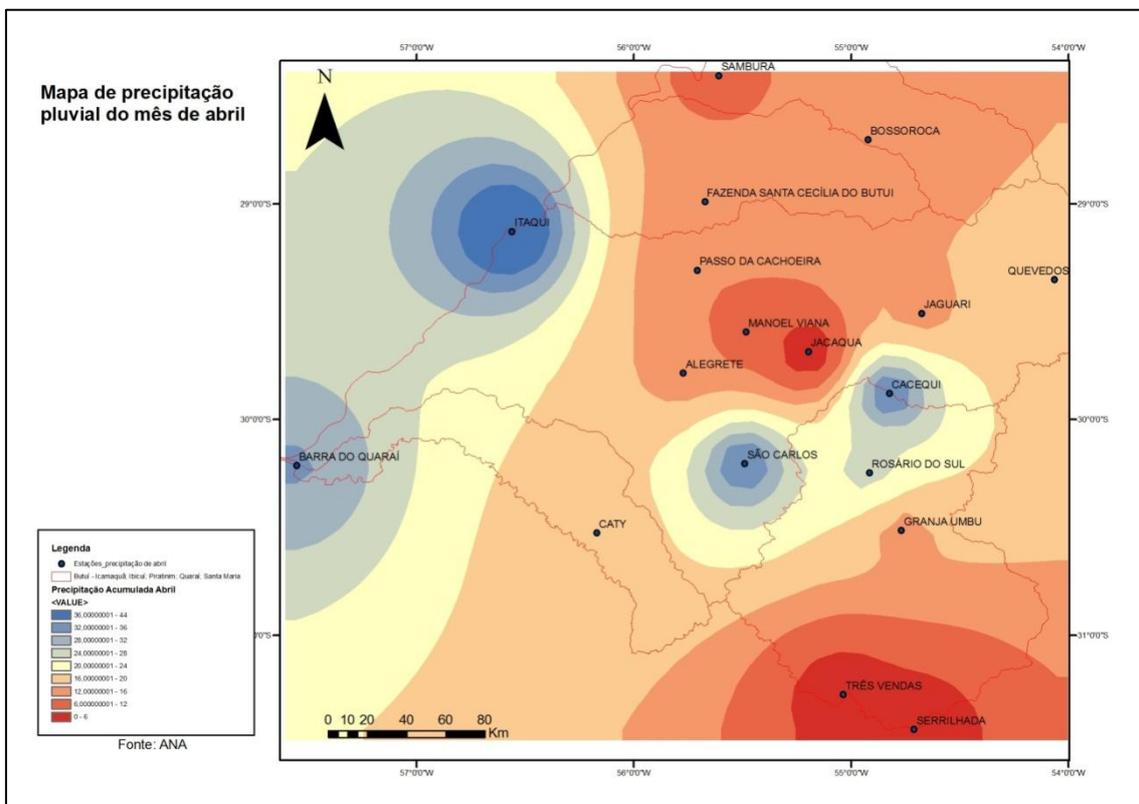


Figura 20 – Distribuição espacial da precipitação pluvial acumulada para o mês de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA(2011)

Neste mês ocorreram dois eventos de precipitação pluvial, o primeiro nos dias 4 e 5 e o segundo evento nos dias 19 e 20. Ambos os eventos serão apresentados a seguir (Figura 21 e Tabela 6).

No dia 4 de abril, quando houve precipitação pluvial acusada por algumas estações pluviométricas, a distribuição espacial foi concentrada no oeste da região (Figura 21), especialmente na estação de São Carlos (15,2 mm) e na da Barra do Quaraí (25,2 mm).

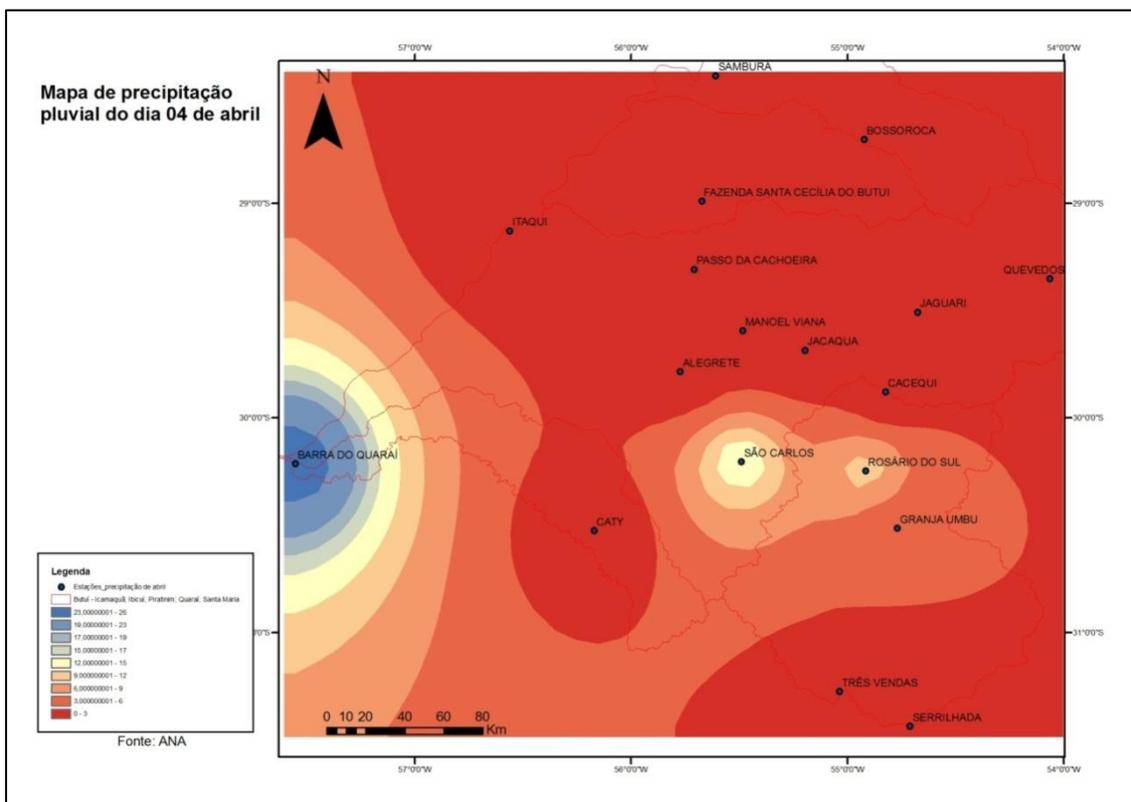


Figura 21 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 04 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA(2011)

No dia 05 de abril, o padrão espacial das precipitações pluviais se modifica, concentrando a mesma nas estações São Carlos (20,5mm) e Cacequi (28,5 mm) (Figura 22 e Tabela 6).

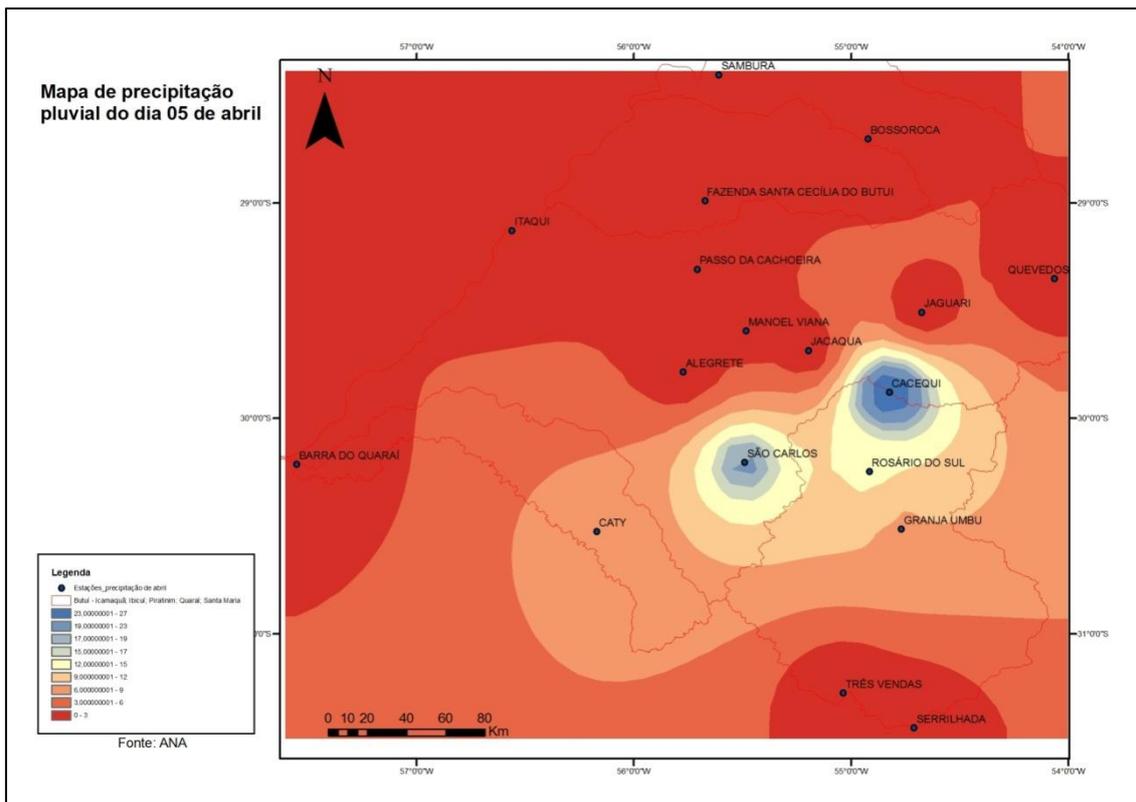


Figura 22 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 05 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

Baseado nas constatações anteriores verificou-se que os padrões de precipitação dos dias 4 e 5 de abril ocorridos na maior parte das estações, obtiveram resposta na umidade do solo em relação aos dias anteriores, como se observa nas Figuras 23 a 28. A umidade do solo cresceu em área e em intensidade, principalmente no centro e sul da região de estudo.

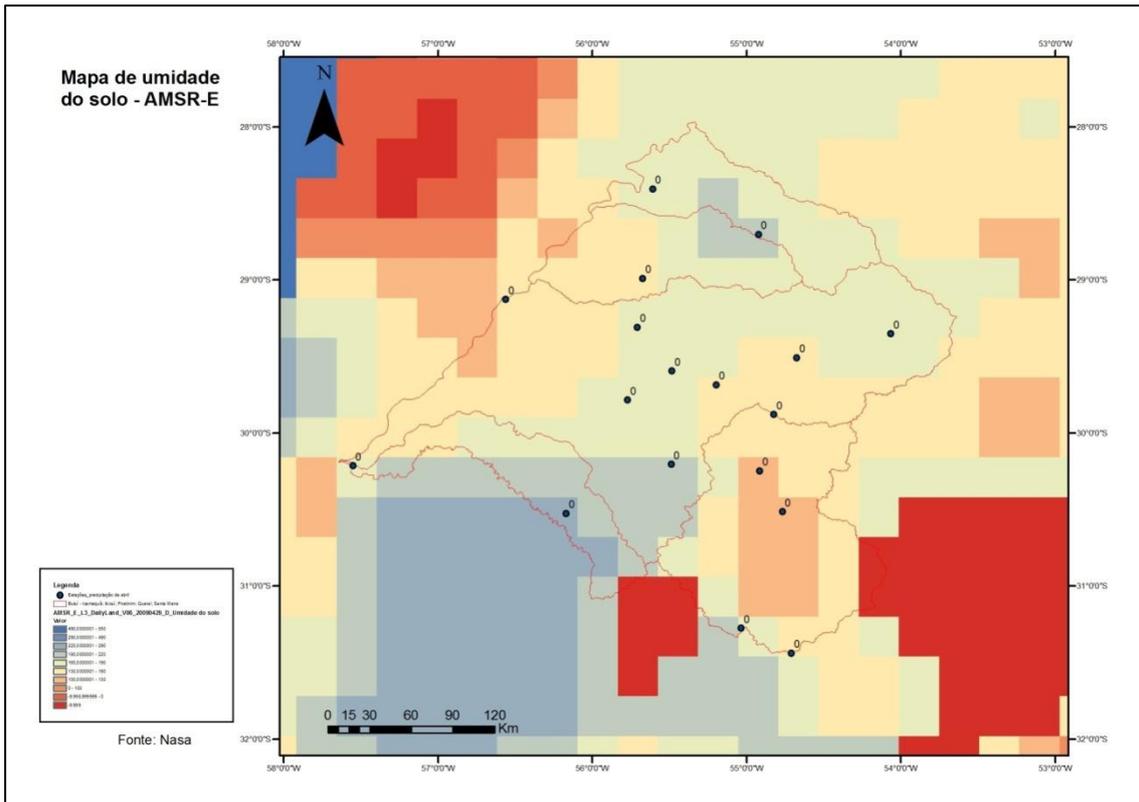


Figura 23 – Mapa de umidade do solo para o dia 01 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

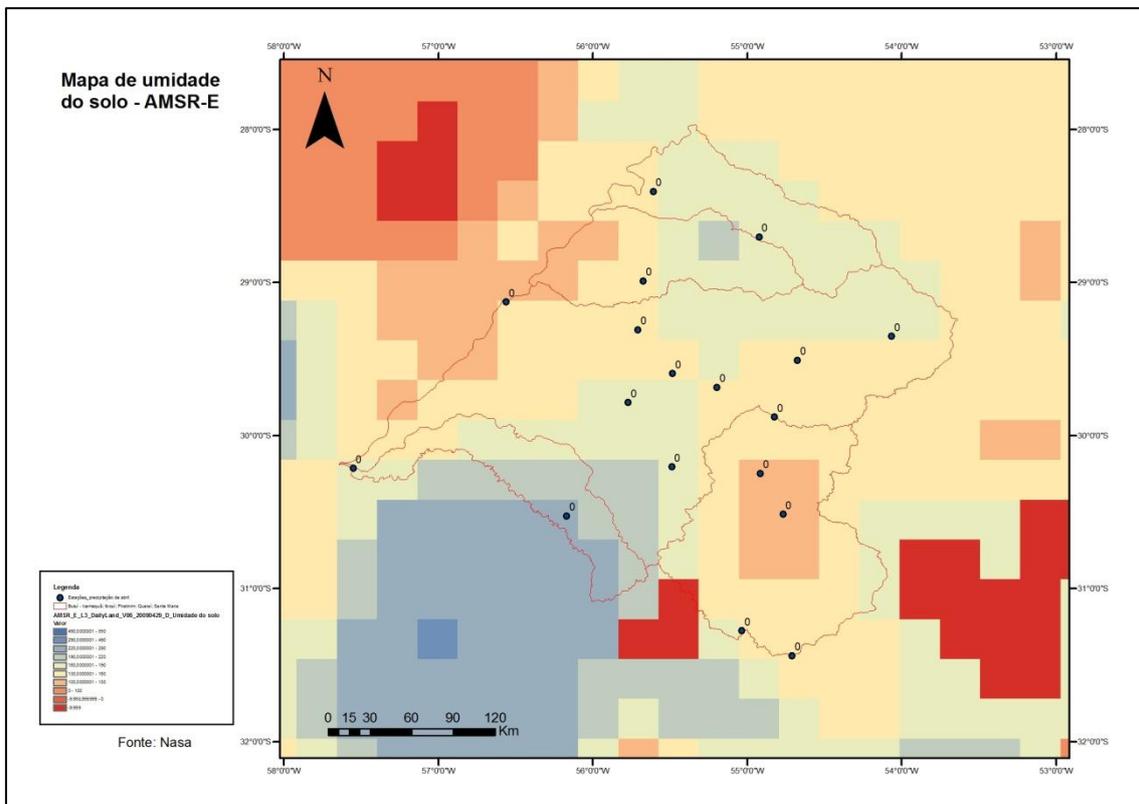


Figura 24 – Mapa de umidade do solo para o dia 02 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

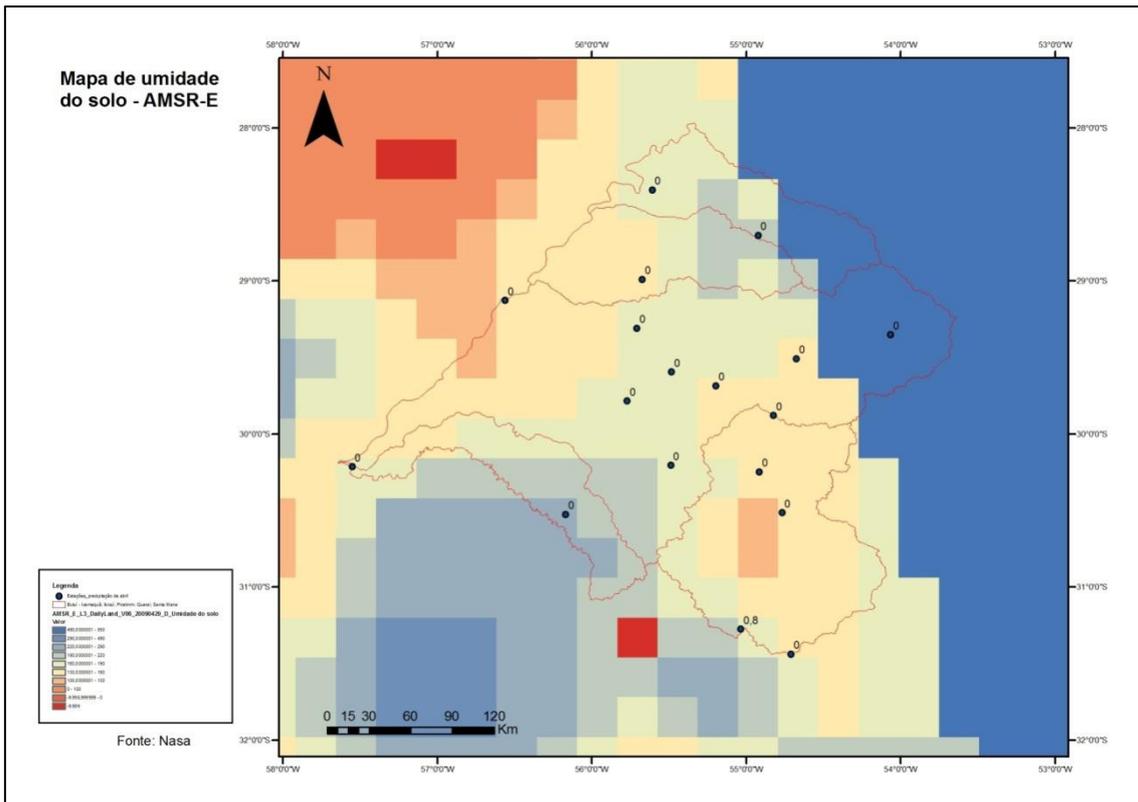


Figura 25 – Mapa de umidade do solo para o dia 03 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

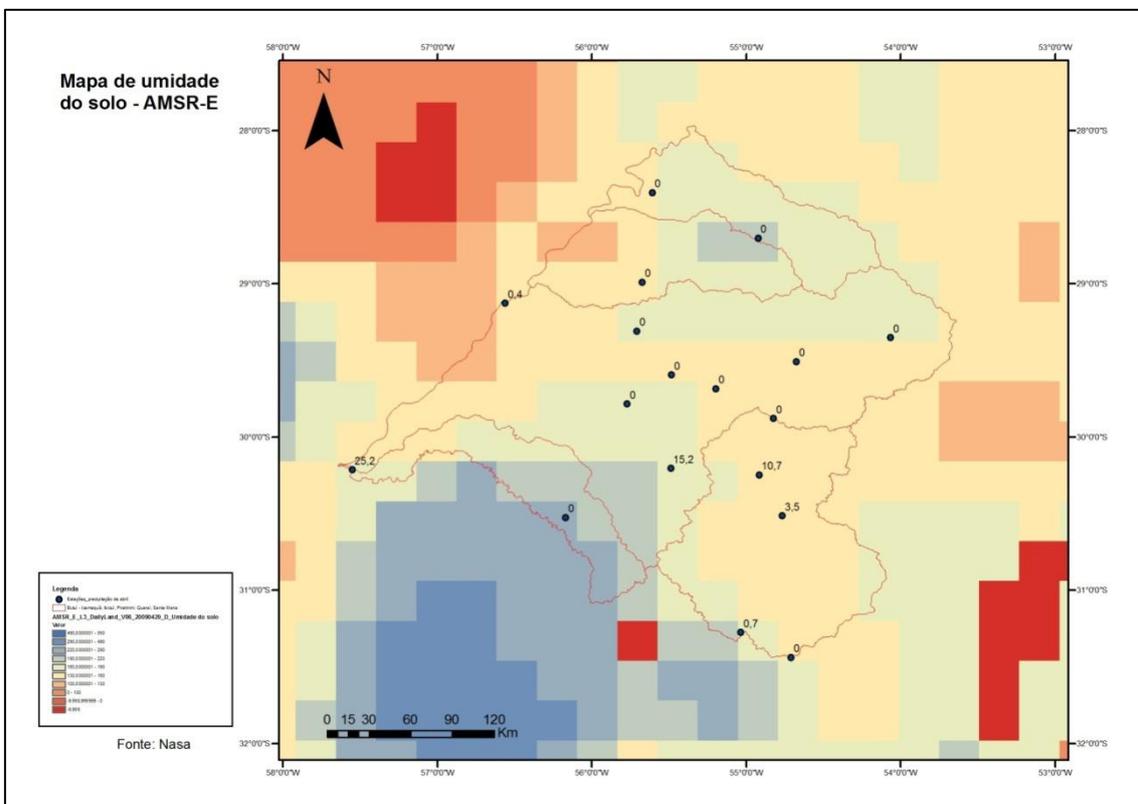


Figura 26 – Mapa de umidade do solo para o dia 04 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

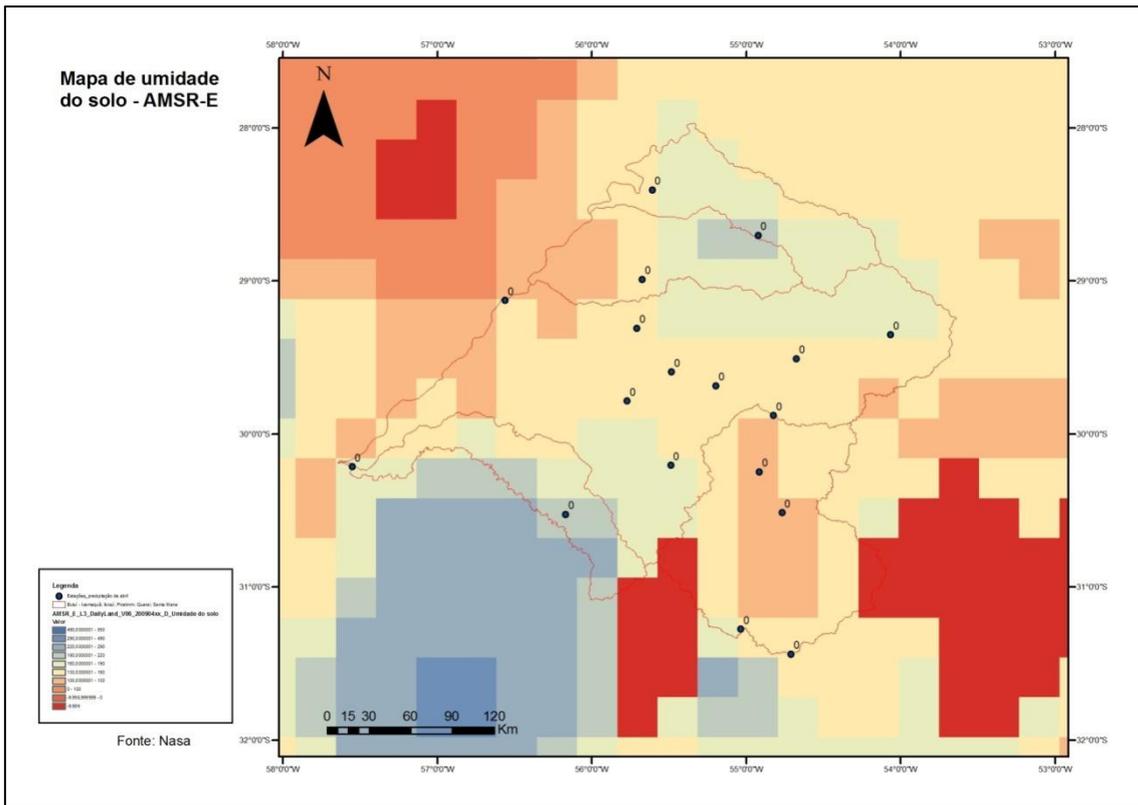


Figura 27 – Mapa de umidade do solo para o dia 06 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

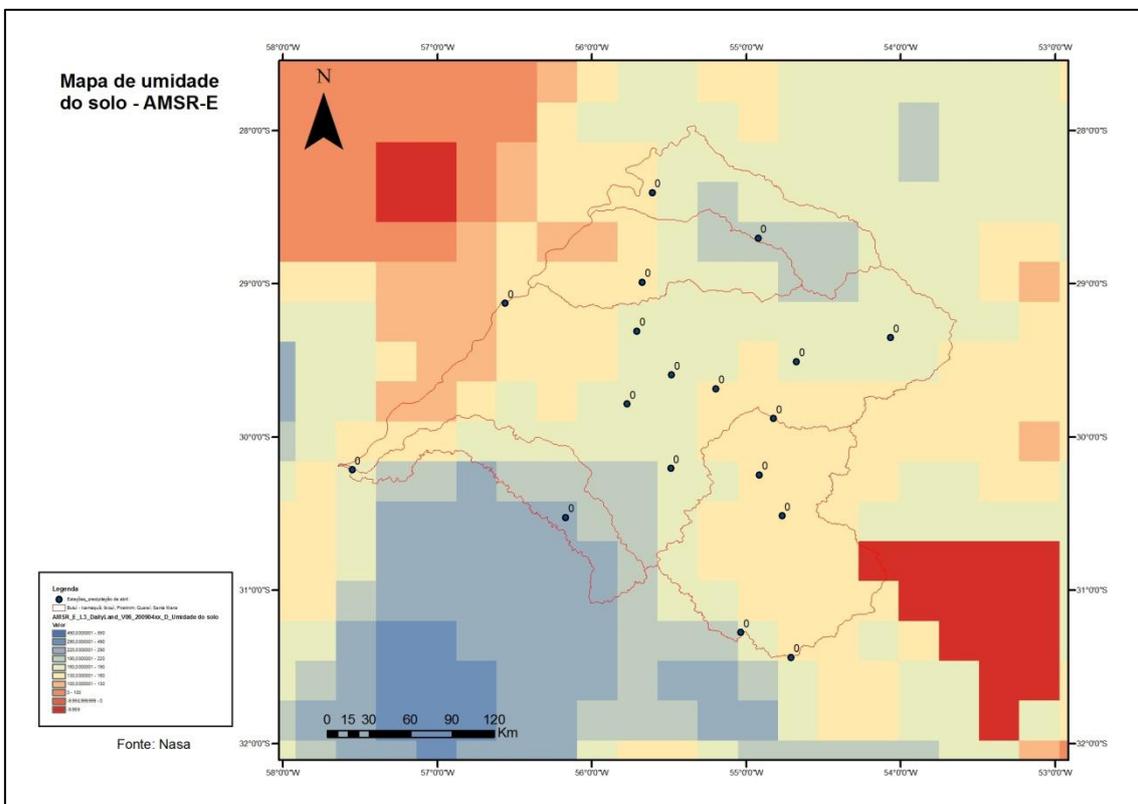


Figura 28 – Mapa de umidade do solo para o dia 07 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

Pode-se observar que houve modificação das zonas de cor azul e cores intermediárias (amarelo) com a sua expansão desde o dia 04 ao dia 07 no sentido sul-norte, salientando que a precipitação pluvial ocorreu no dia 04 (Figura 21). Ressalta-se que a bacia do rio Santa Maria, a sudeste da região, mostrou variação da umidade do solo no dia 6 de abril, tendo reduzido nesse dia e aumentado no dia seguinte, sem razão aparente, pois não houve precipitação pluvial. Interessante observar também que o maior aumento de umidade do solo se deu no dia anterior à precipitação pluvial ocorrida (dia 03). Porém como foi salientado anteriormente, pode ter havido precipitação pluvial em alguns locais da cena do mapa, principalmente ao sul da região, onde não havia estação pluviométrica. O que se pode inferir é que de maneira geral, o comportamento espacial acompanhou a ocorrência de precipitação pluvial, principalmente observada a partir dos padrões de expansão das zonas azuis (classes com maior umidade) e das zonas onde as manchas laranja médio (intervalo de 0 a 100 m^3m^{-3}) variaram ampliando e retraindo. Quanto às manchas vermelho escuras significam ausência de dados.

No dia 19, o padrão espacial mostrou precipitação pluvial no centro da região com índice baixo, por exemplo, Alegrete com 14,2 mm. Já no dia 20 a ocorrência de precipitação pluvial aconteceu de maneira mais intensa e espalhada por toda a área norte da região. O maior registro de precipitação se deu na estação de Itaqui (42,1 mm) e na de Quevedos (16,2 mm) (Tabela 6).

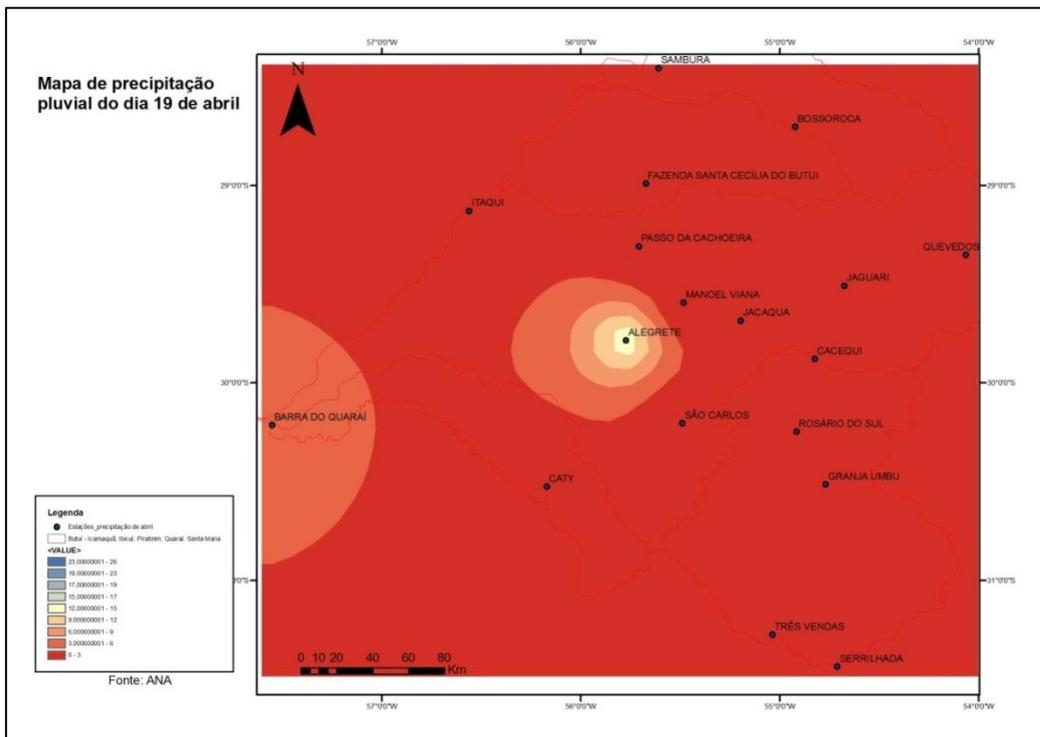


Figura 29 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 19 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

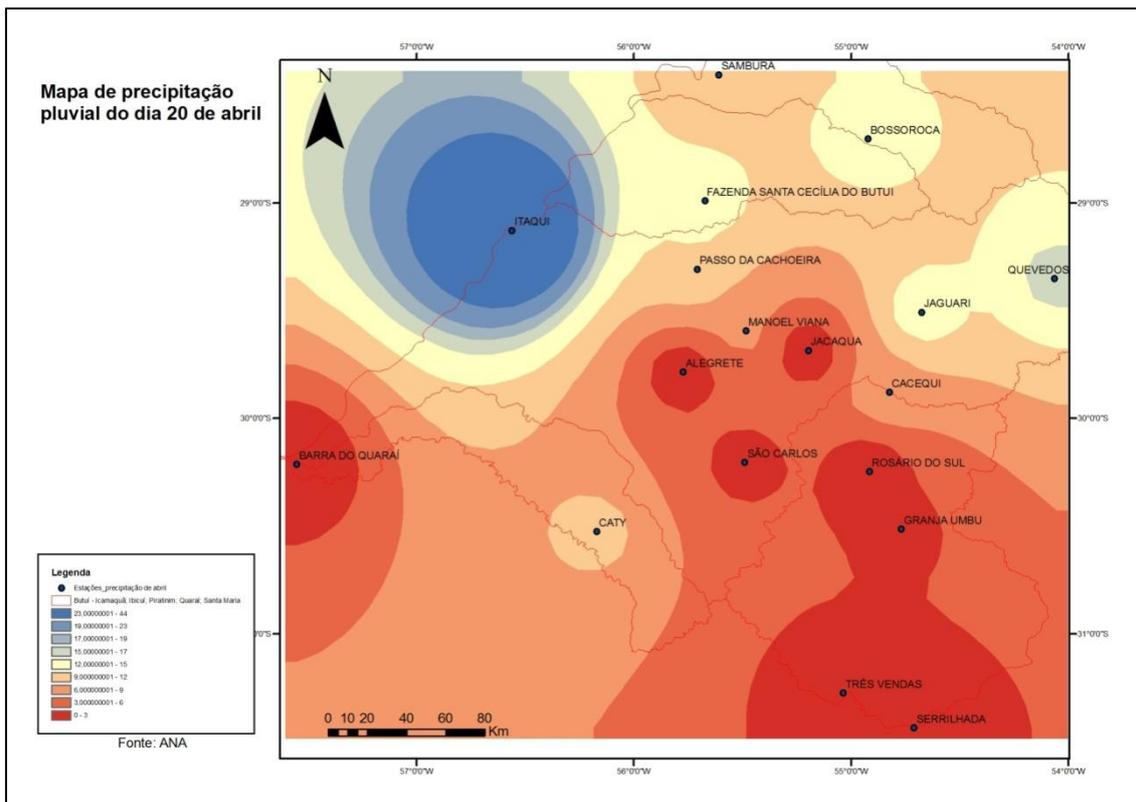


Figura 30 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 20 de abril na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

Analisando este segundo período de precipitação pluvial ocorrida ainda no mês de abril, verifica-se maior presença de umidade no solo devido à ocorrência de maior precipitação pluvial onde as zonas azuladas tomam conta da cena no mesmo dia da ocorrência da precipitação, dia 20 (Figuras 31 a 35).

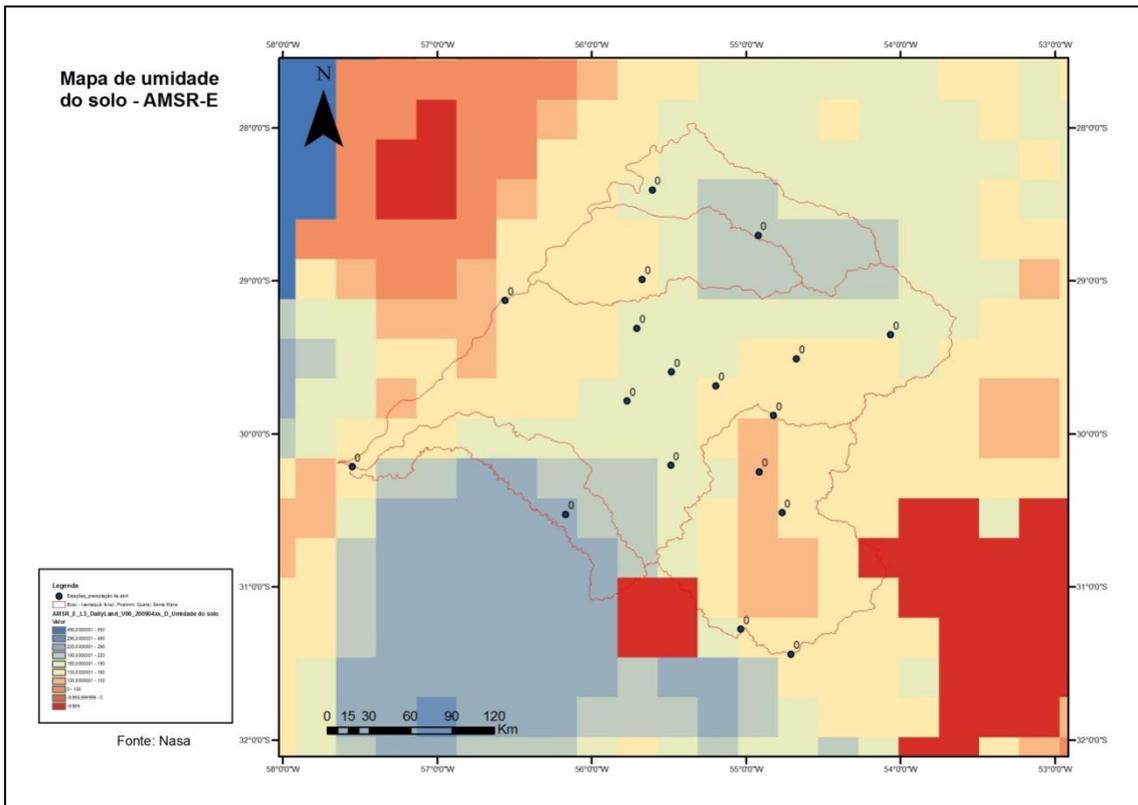


Figura 31 – Mapa de umidade do solo para o dia 17 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

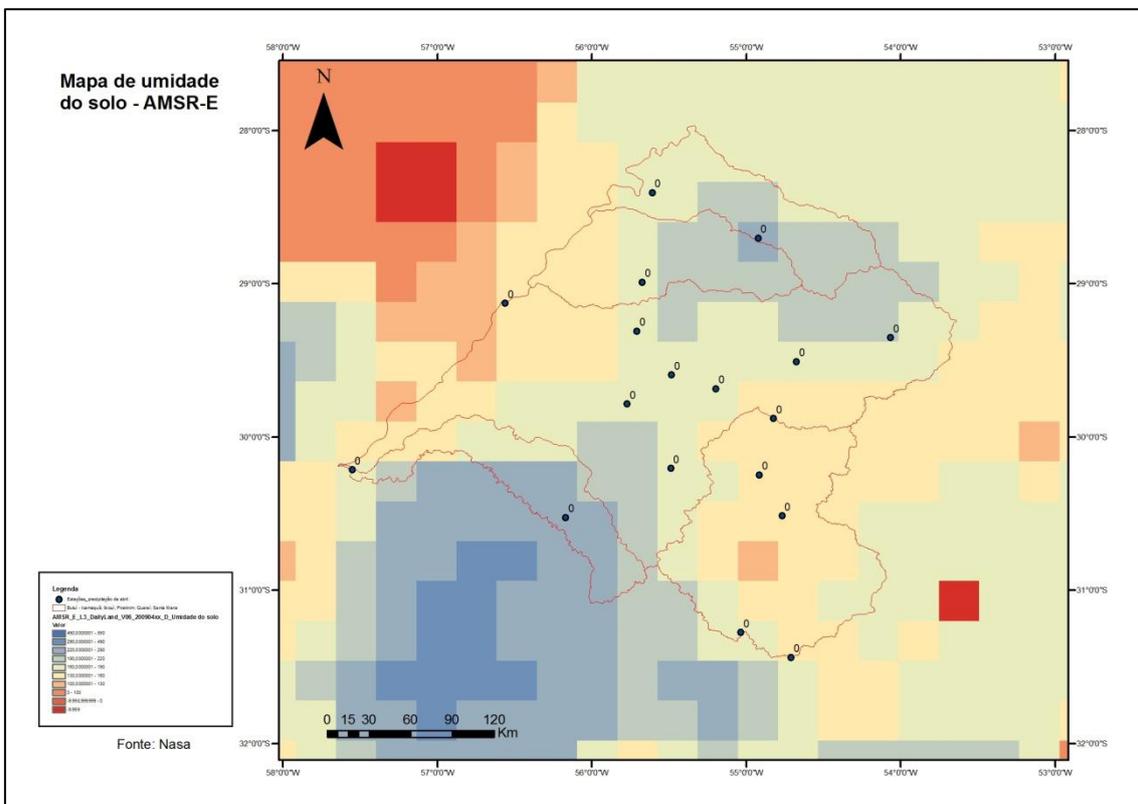


Figura 32 – Mapa de umidade do solo para o dia 18 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

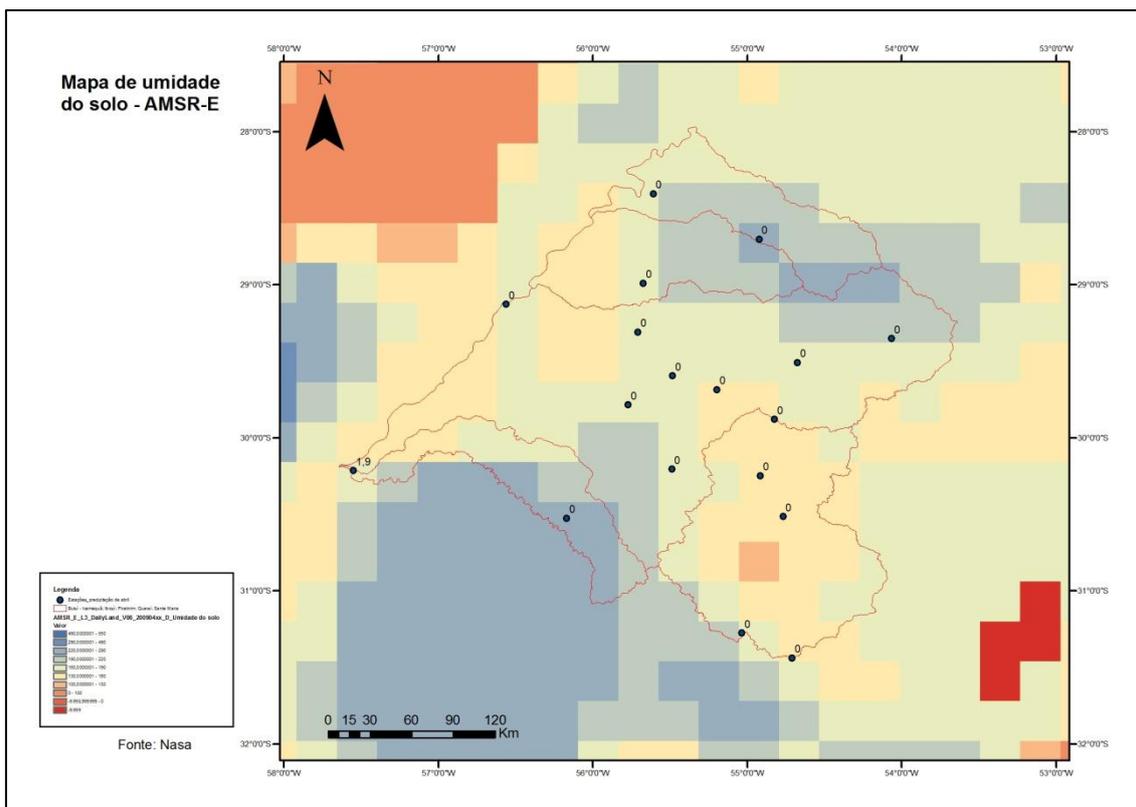


Figura 35 – Mapa de umidade do solo para o dia 23 de abril de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

Interessante observar que a precipitação pluvial começa a ocorrer dia 19 e termina no dia 20, porém com maior intensidade nesse último dia. Como não se conseguiu dados do sensor para o dia 19, não houve a possibilidade de acompanhar a evolução, porém observando o dia 18 e depois o dia 20, verifica-se grande modificação dos valores de umidade do solo no sentido de aumento. Outro fato passível de observação foi a continuidade das variações de umidade do solo, mesmo após a ocorrência das precipitações pluviais. Houve modificações substanciais principalmente ao norte e a sudeste da região no dia 22, quando houve a diminuição da umidade do solo, verificada nas zonas azuladas e nas zonas alaranjadas intermediárias.

No dia 23 de abril houve a elevação novamente da umidade do solo, sem motivos aparentes. Isso pode se dever a várias situações, entre elas, a ocorrência de precipitação pluvial no entorno, principalmente porque as zonas que mais variam são ao norte da região que estão próximas de áreas não monitoradas no estudo.

Outra situação interessante é a zona ao sul da região de estudo com presença de forte umidade do solo. Observa-se que esta mesmo tendo diminuição das manchas de umidade (sem presença de precipitação pluvial) apresenta sempre índices superiores de umidade do solo em relação às outras áreas. Isso pode se dever ao tipo de solo e da presença de grandes corpos hídricos. Outra relação que se pode fazer é da área ao sudeste que define a bacia do rio Santa Maria, onde a umidade está sempre mais baixa

do que as outras áreas. Isso pode ser devido ao tipo de solo na área, que se sabe é mais raso (STRECK, 2002). Porém o que nos mostra o mapa de solos é que há a presença de dois tipos de solos argilosos na bacia, o podzólico e o brunizem. Essas características não condizem com solos que não retém a umidade, assim como a área de maior umidade indicada pelo sensor também não condiz com o tipo de solo presente, o litólico.

Se a observação dos solos for realizada como um todo na área, observa-se que os solos de origem litólica e os latossolos estão presentes nas áreas de maior umidade, ao contrário dos solos podzólicos e brunizem que constituem as áreas de menor umidade indicada pelos dados do sensor (Figura 8).

No mês de novembro a distribuição da precipitação seguiu um padrão diferenciado, em função das maiores precipitações pluviais ocorridas. Os mapas de distribuição de precipitação pluvial não foram representados com as mesmas classes de intervalos de valores, pois as precipitações desse mês foram muito mais intensas estabelecendo valores de até 160 milímetros diários. O que se verificou foi que em termos espaciais, a precipitação pluvial aconteceu de maneira mais homogênea, apresentando maiores valores no norte e oeste e em uma estação do sul da região, como mostra a Figura 36. As precipitações mais acumuladas mostram valores de até 760 mm ao mês (áreas que aparecem em azul).

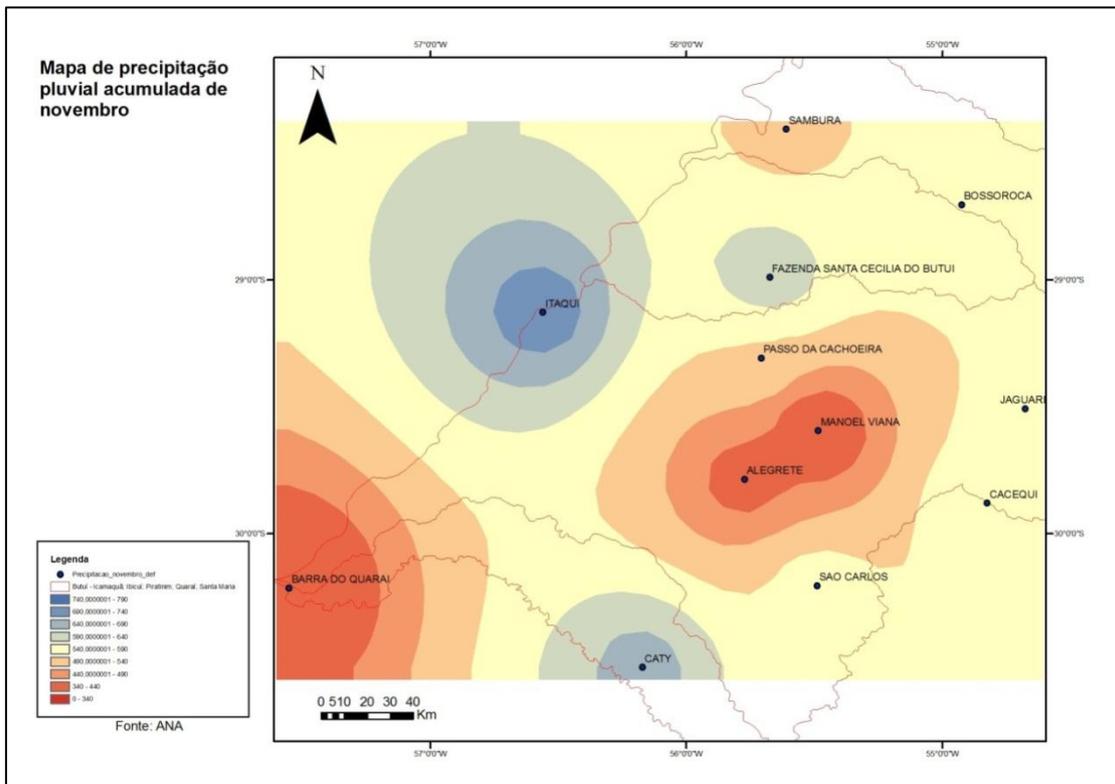


Figura 36 – Distribuição espacial da precipitação pluvial acumulada para o mês de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

Para avaliar esse mês e detectar o quanto a precipitação pluvial influenciou a distribuição da umidade do solo ao longo da região, foram analisados os dias de maiores ocorrências desta precipitação pluvial (Figuras 37, 38 e 39). Nos dias 01 e 02 não houve precipitação e no dia 03 a mesma começou pelo leste da região, em Cacequi, 135,4 mm (Figura 37 e Tabela 7). No dia 04 a precipitação pluvial se expandiu pela região como vemos nas cores avermelhadas (o intervalo de cor mais vermelha é a quase ausência de precipitação pluvial e a cor vermelha mais tênue é a presença de uma leve precipitação pluvial – entre 14 mm e 28 mm). Outro período interessante é dos dias 10 e 11 quando houve uma retração na precipitação prenunciando um dia sem nenhuma precipitação, o dia 12, como mostram as Figuras 39 e 40.

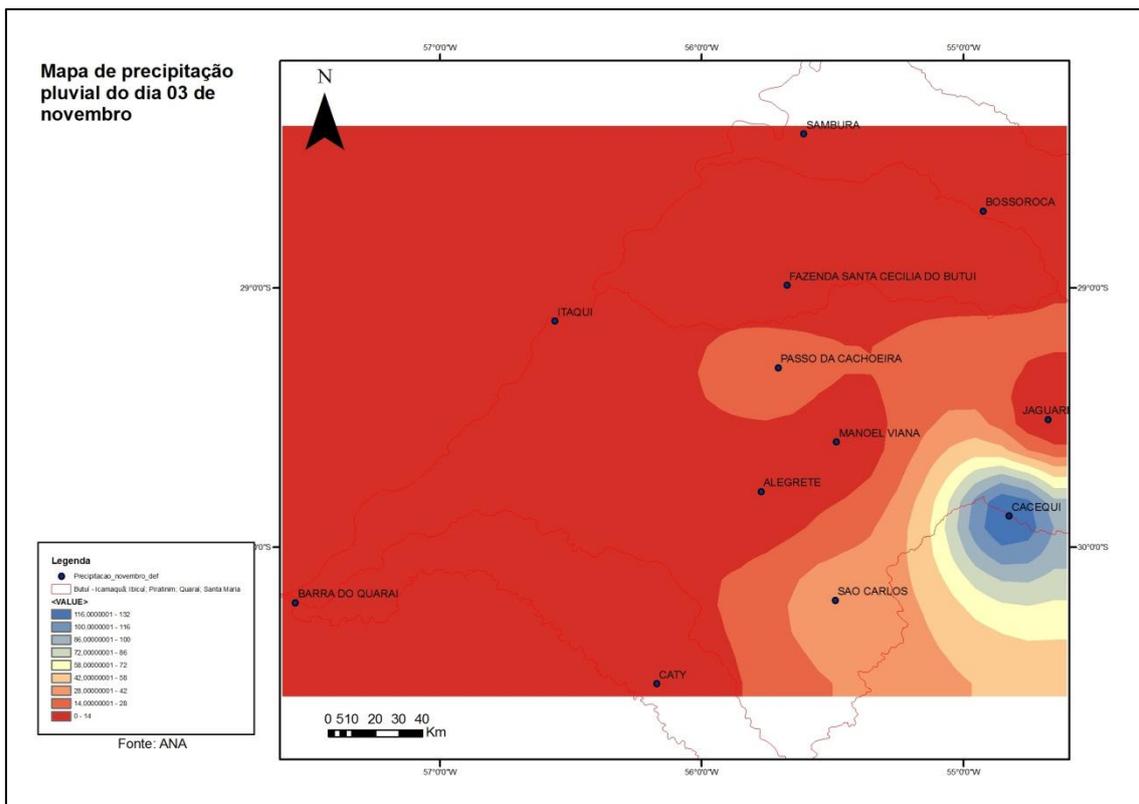


Figura 37 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 03 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

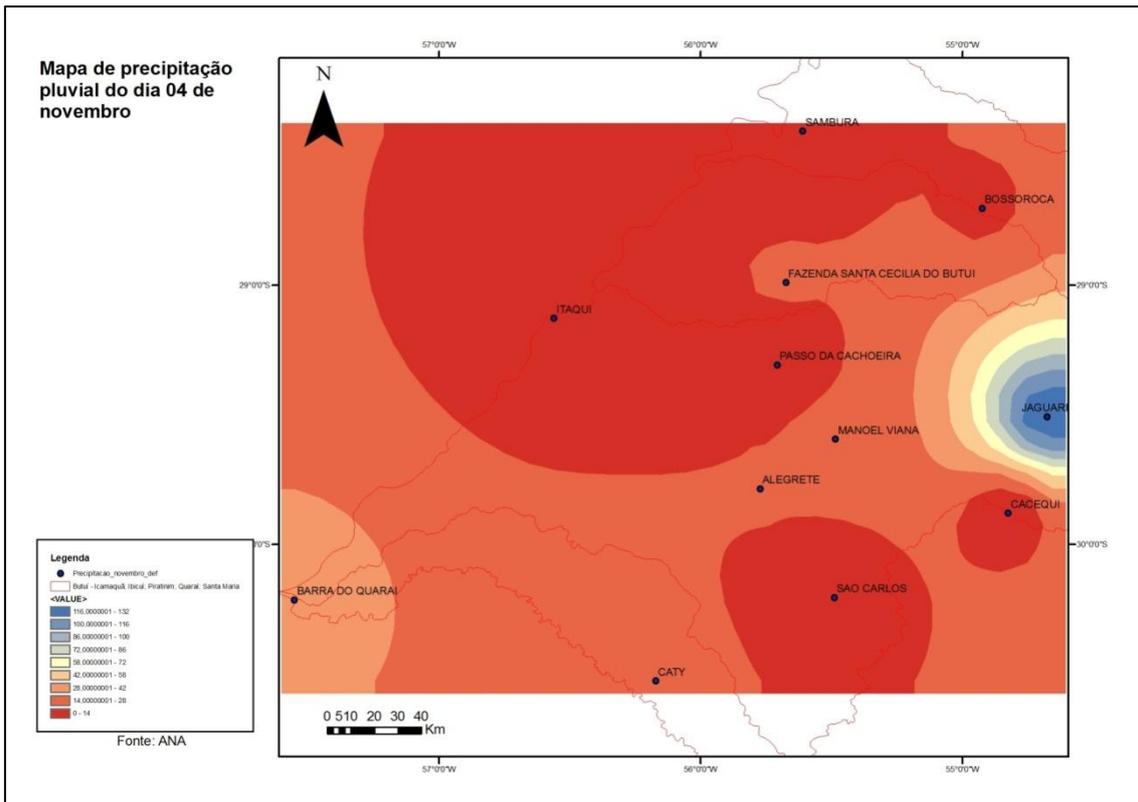


Figura 38 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 04 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

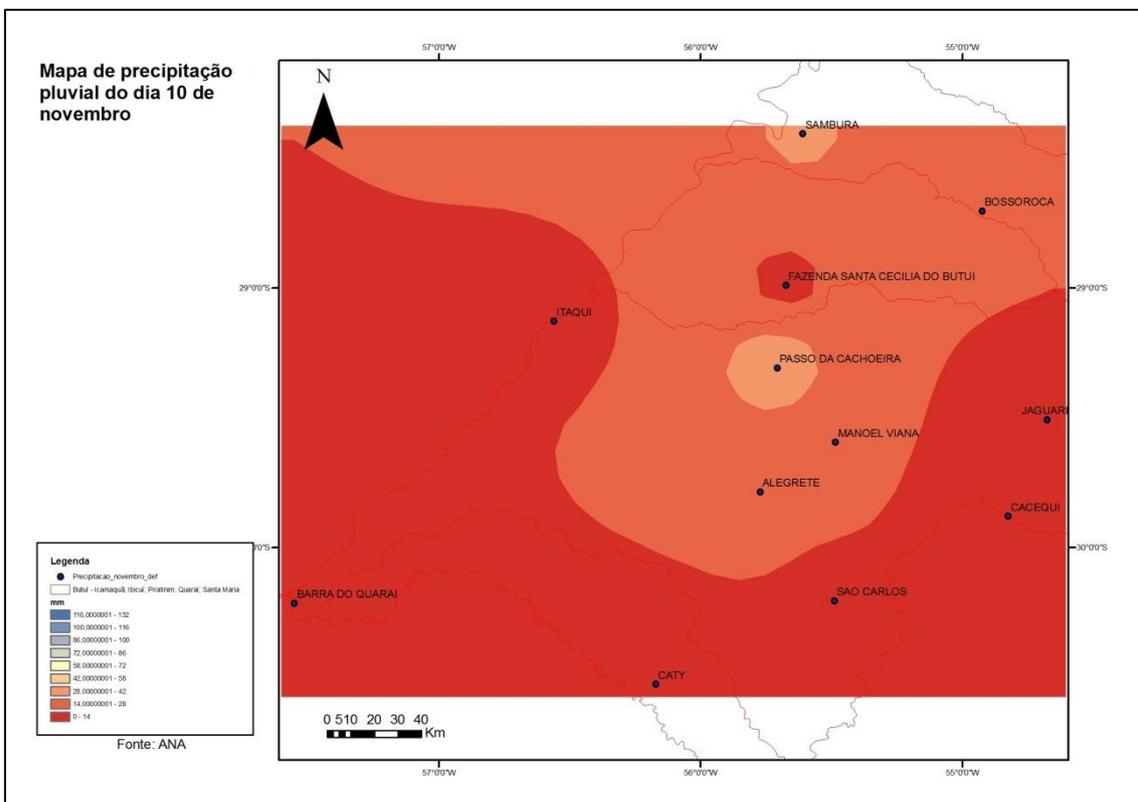


Figura 39 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 10 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

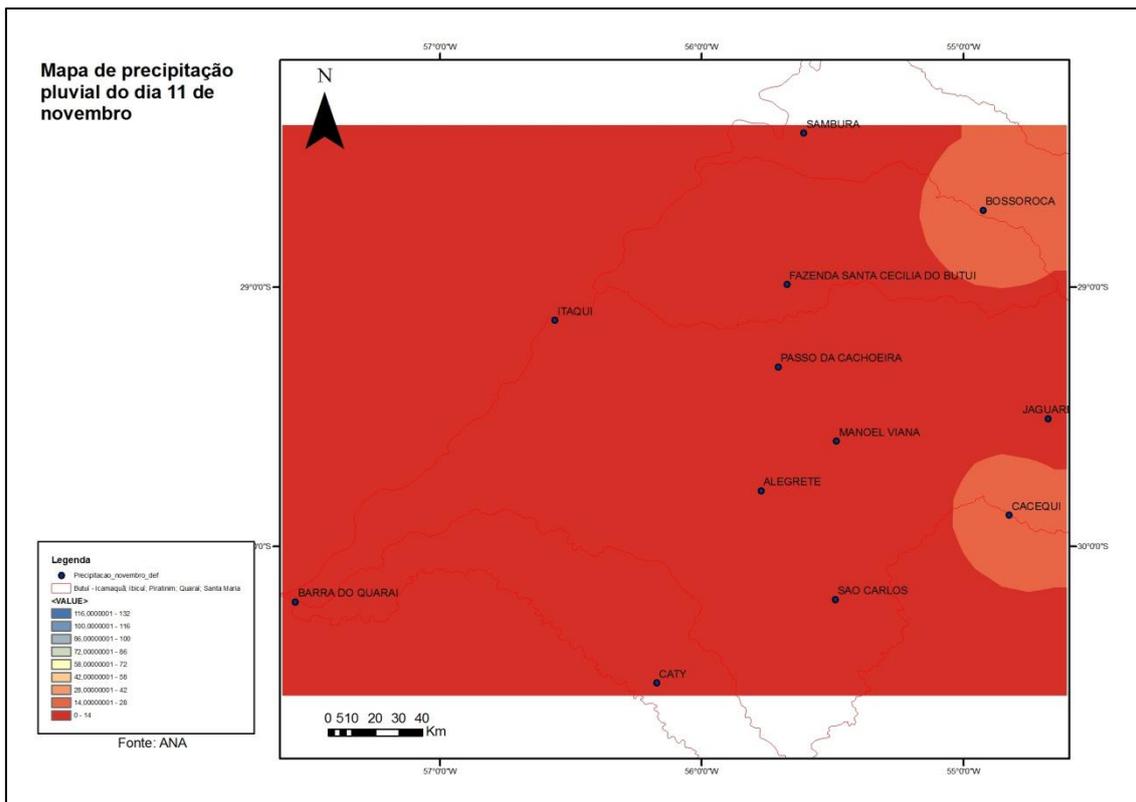


Figura 40 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 11 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

Observando os dados de umidade do solo para o mês de novembro, verifica-se que nesse mês de maiores precipitações pluviais as estimativas do sensor dão maior resposta, apresentando cenas com mais zonas azuladas. O mês inicia sem precipitação pluvial após um período seco e isso se reflete nas cenas dos dias 01 e 02 de novembro (Figura 41 e 42), onde os valores de umidade são muito baixos para toda a área.

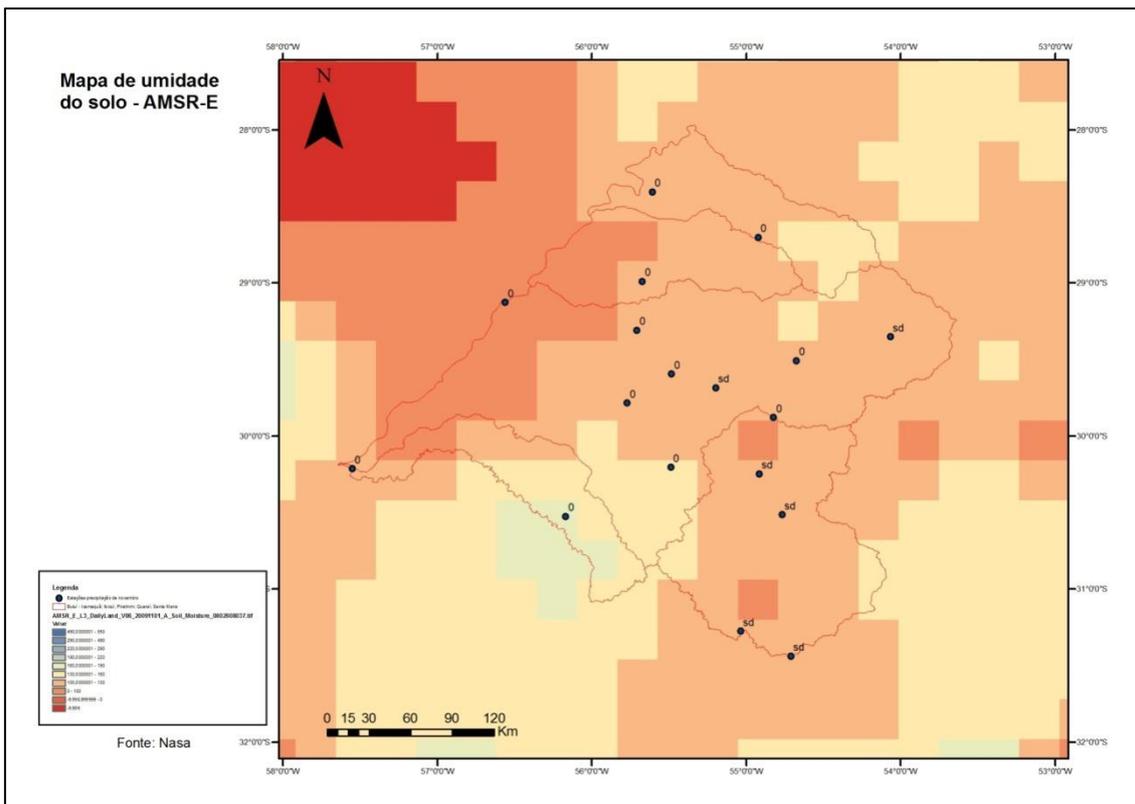


Figura 41 – Mapa de umidade do solo para o dia 01 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

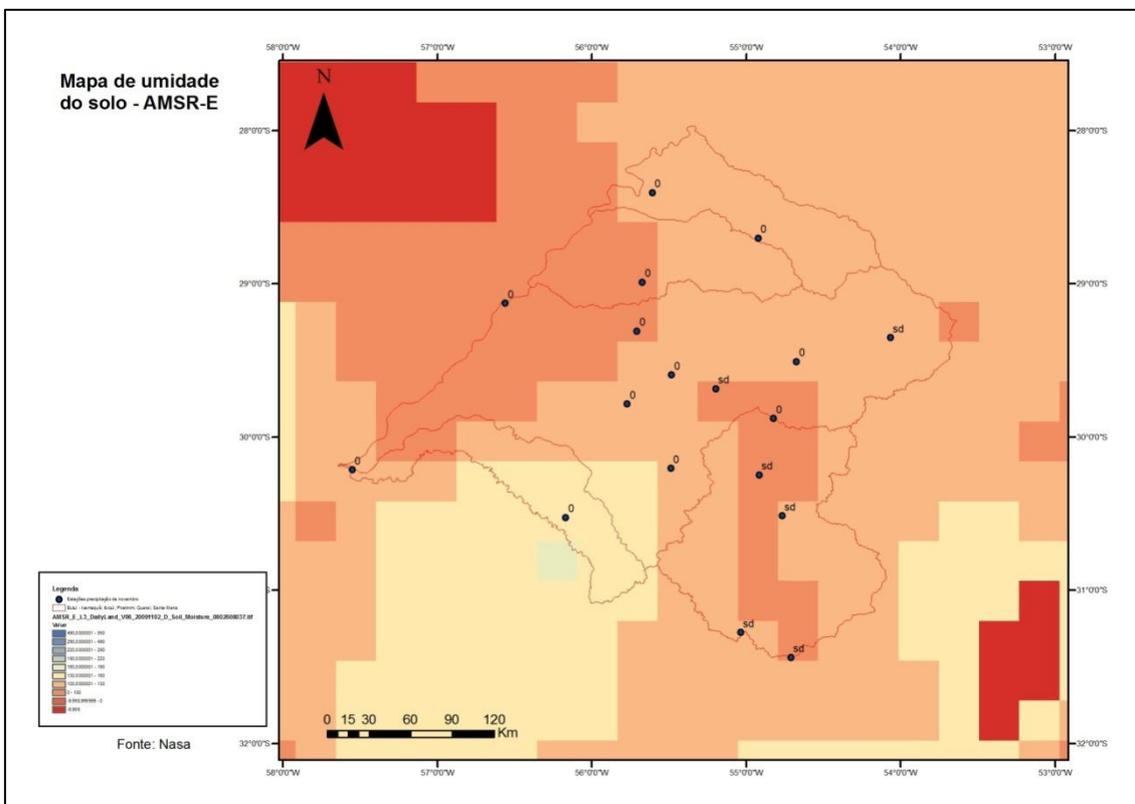


Figura 42 – Mapa de umidade do solo para o dia 02 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

Já a partir dos dias 03 e 04 de novembro, a umidade do solo começa a se modificar em função das precipitações pluviais ocorridas no sul da região (Figuras 43 e 44). O que se segue nas próximas cenas é o aumento constante da umidade do solo com uma relação direta com a precipitação pluvial ocorrida, inclusive nos padrões espaciais, onde a umidade segue localmente o registro da precipitação (Figuras 45 à 50). Nos dias 05 e 07, a elevada precipitação pluvial faz avançar a zona de maior umidade do solo (áreas azuladas) e culmina com o dia 08, onde as altas precipitações pluviais em toda a região do dia anterior (dia 7) resultam no aumento significativo da umidade em toda a área. É interessante observar que a umidade do dia 07 ainda não respondeu às elevadas precipitações pluviais desse dia. Isso pode ser devido ao horário da ocorrência das precipitações pluviais que pode não ter coincidido com o horário da passagem do satélite na tomada do dado. Observa-se também que no dia 09, quando a precipitação pluvial cessa principalmente na área norte da região, a umidade diminui, aumentando novamente no dia 10 com novas precipitações pluviais e reduzindo novamente no dia 11 com a diminuição das precipitações pluviais.

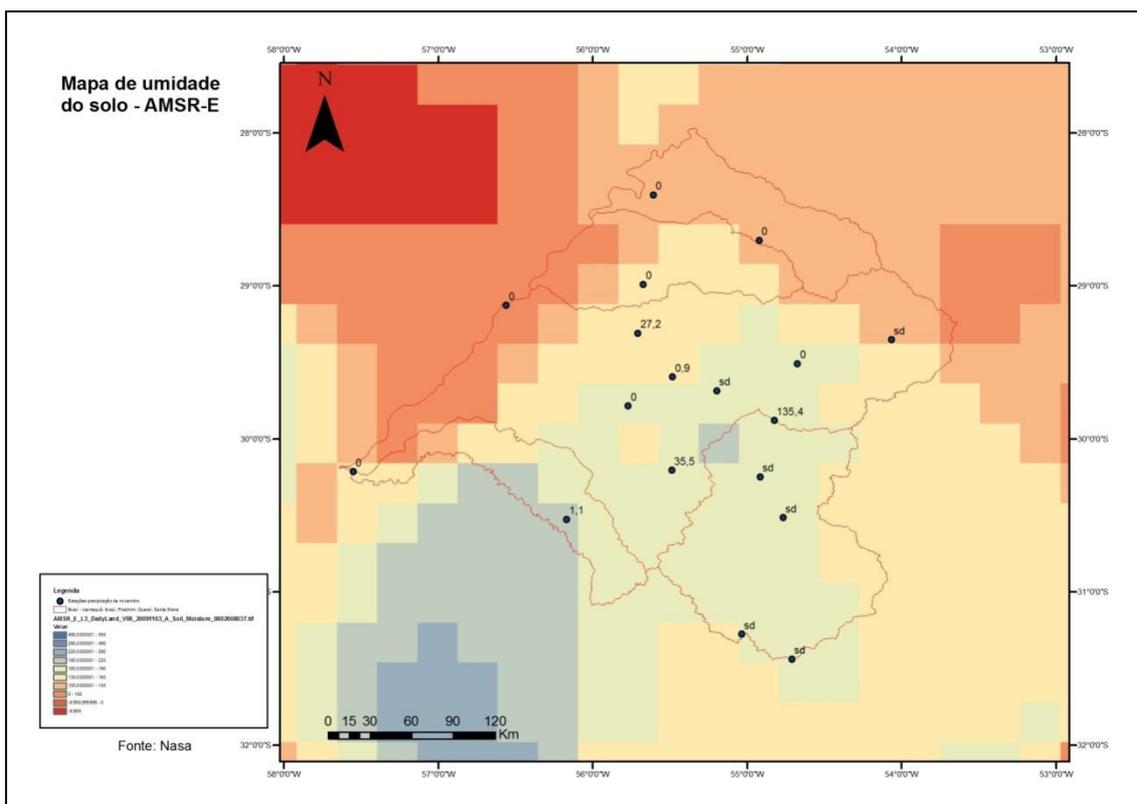


Figura 43 – Mapa de umidade do solo para o dia 03 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

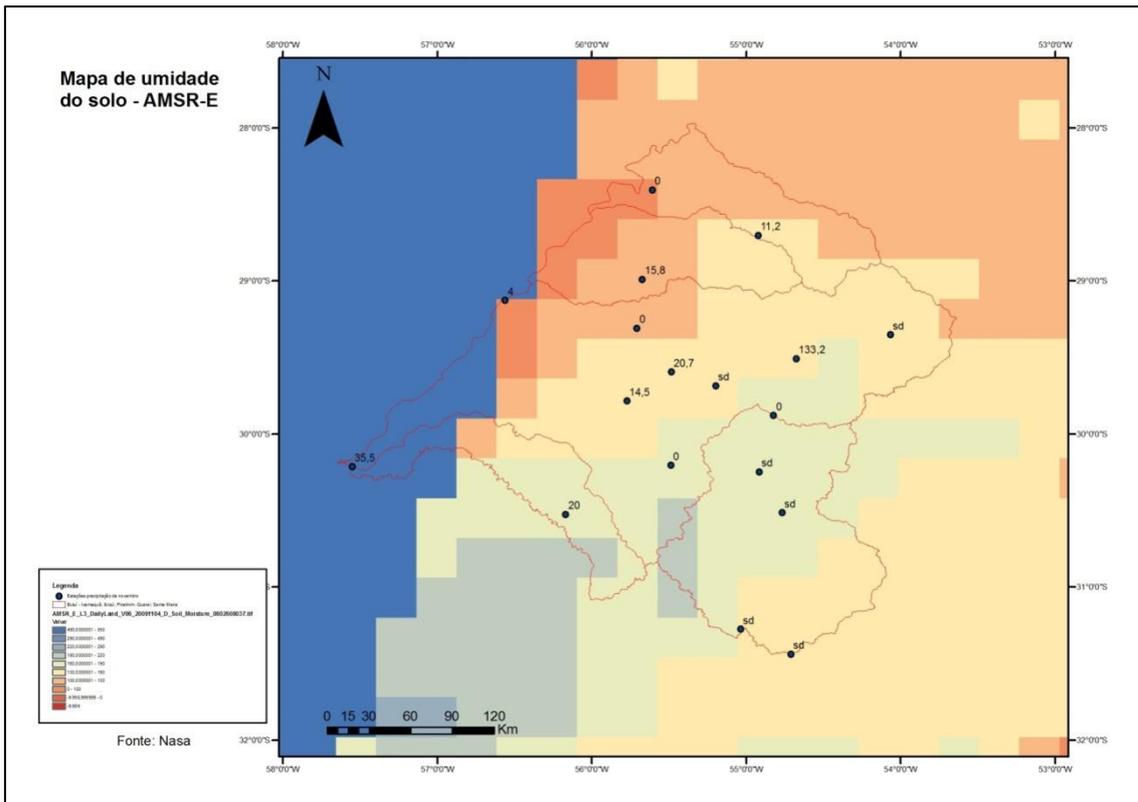


Figura 44 – Mapa de umidade do solo para o dia 04 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

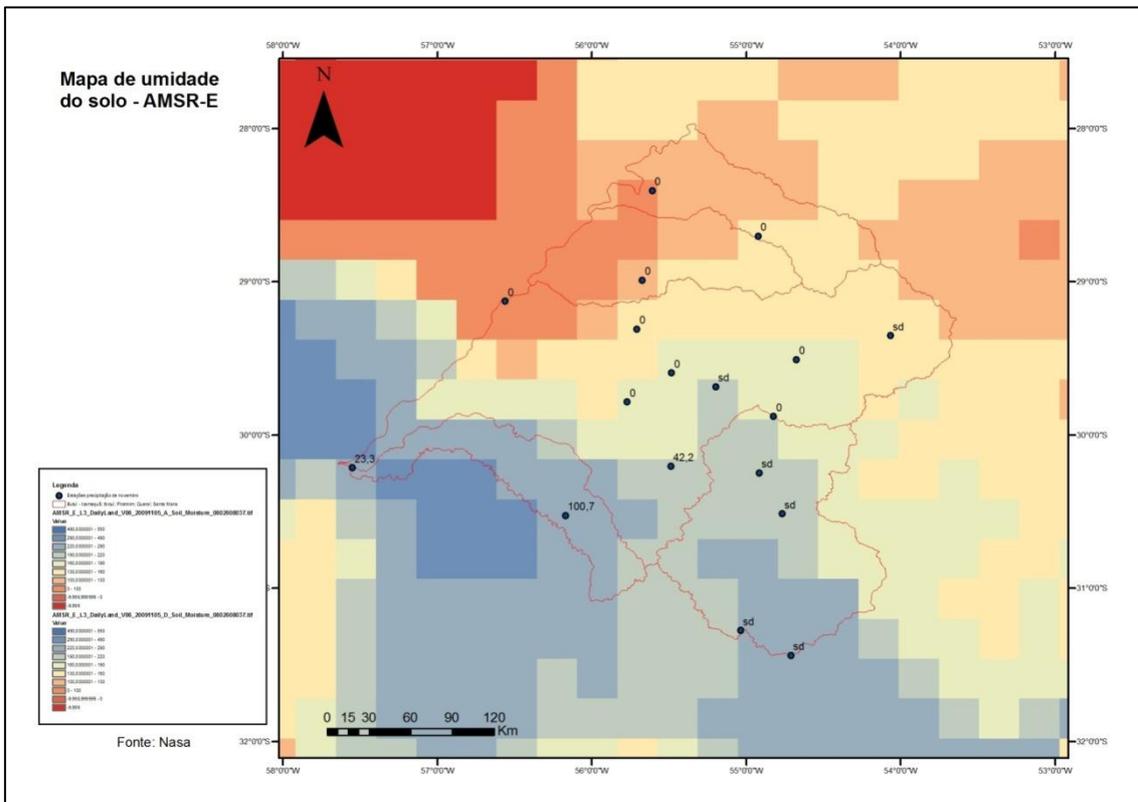


Figura 45 – Mapa de umidade do solo para o dia 05 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

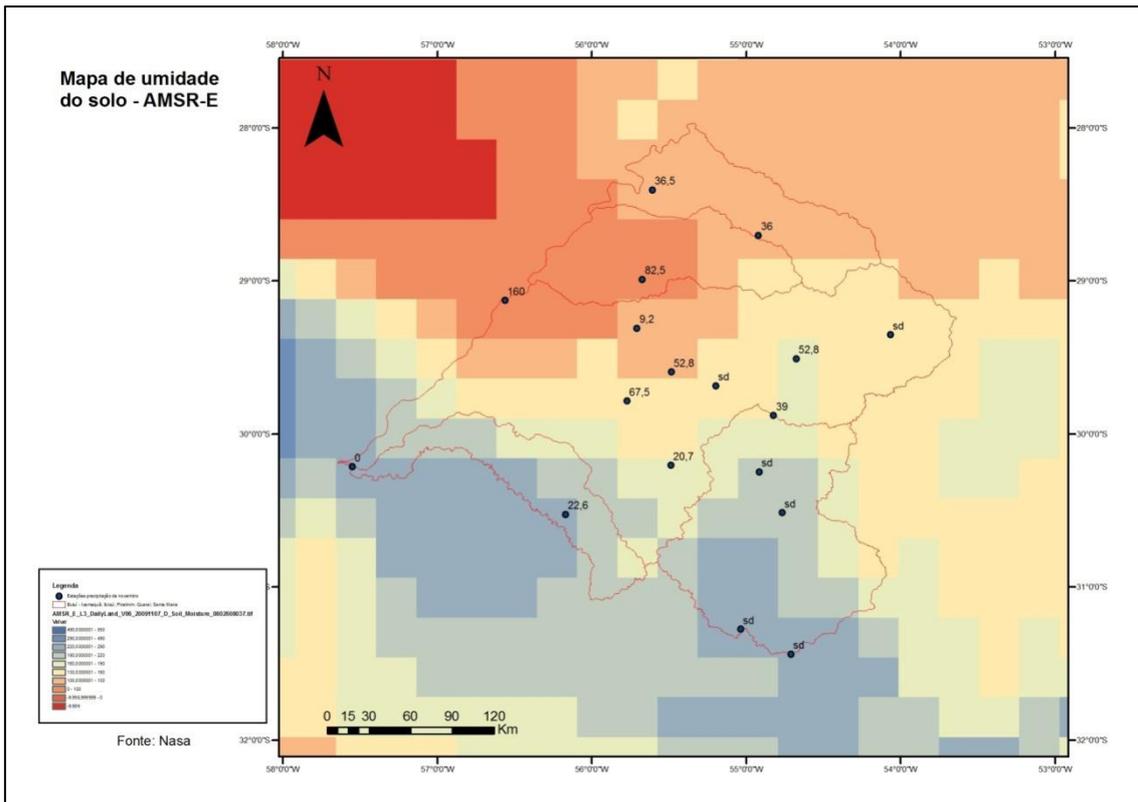


Figura 46 – Mapa de umidade do solo para o dia 07 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

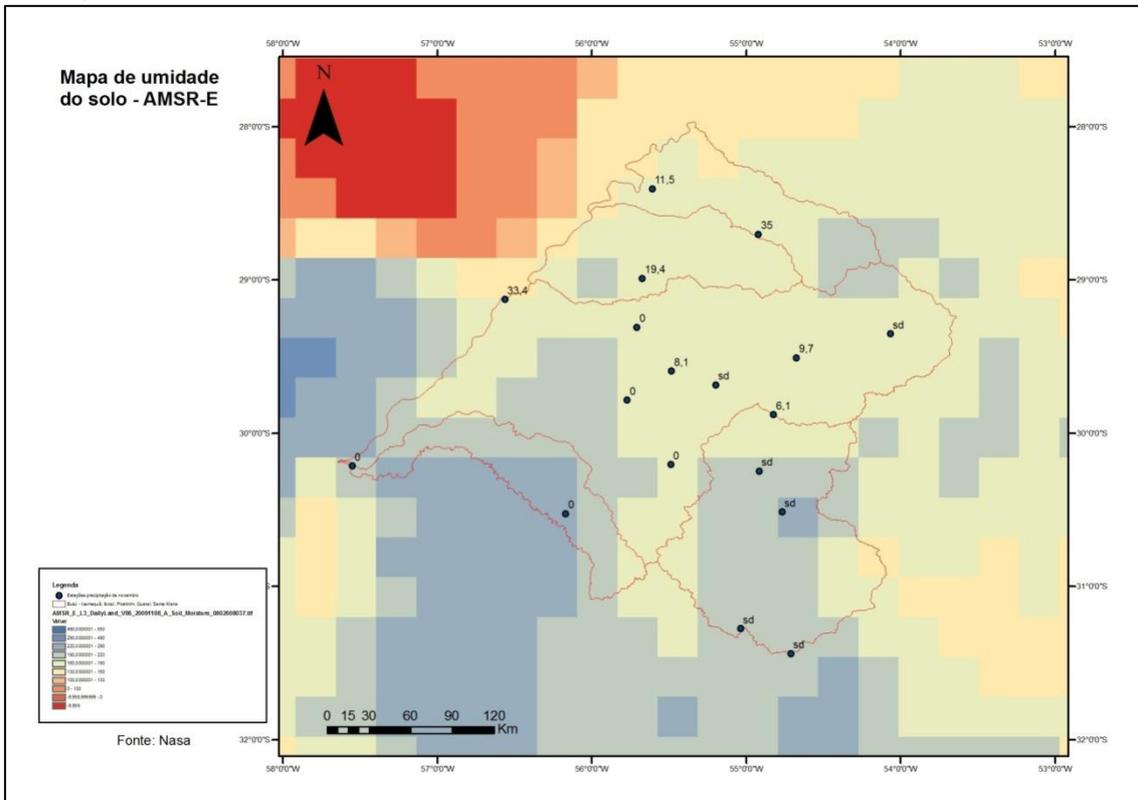


Figura 47 – Mapa de umidade do solo para o dia 08 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

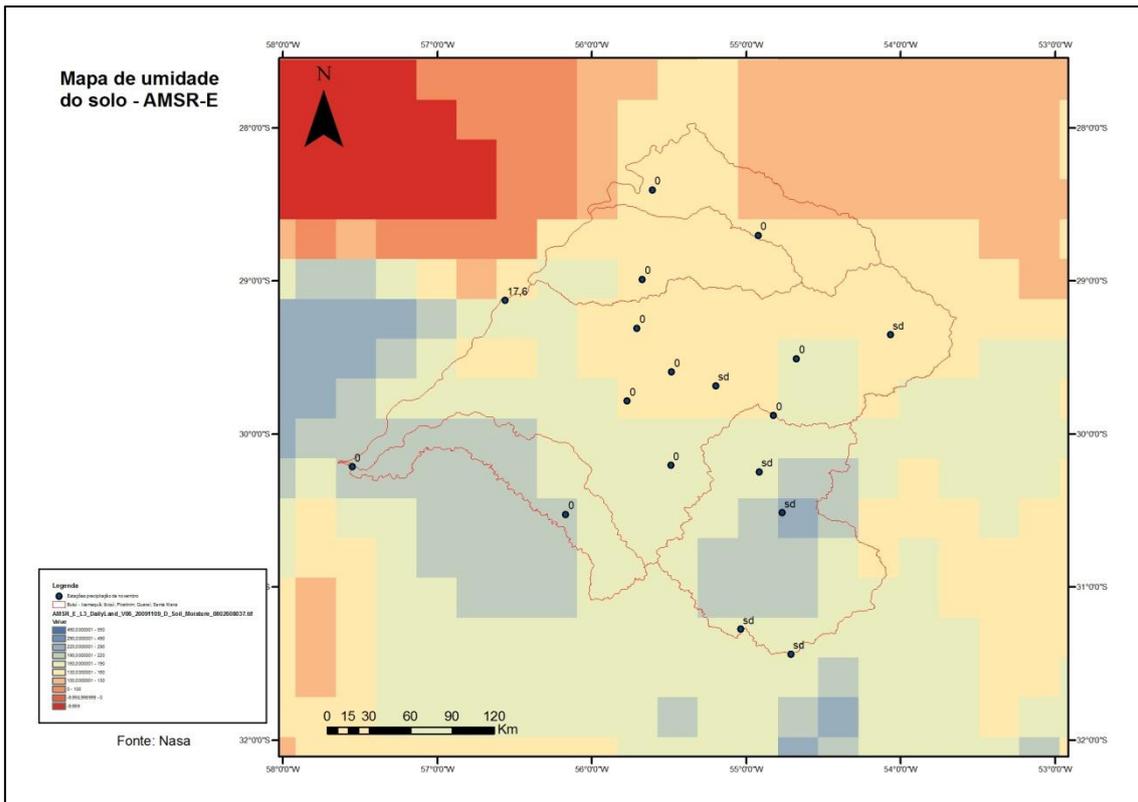


Figura 48 – Mapa de umidade do solo para o dia 09 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

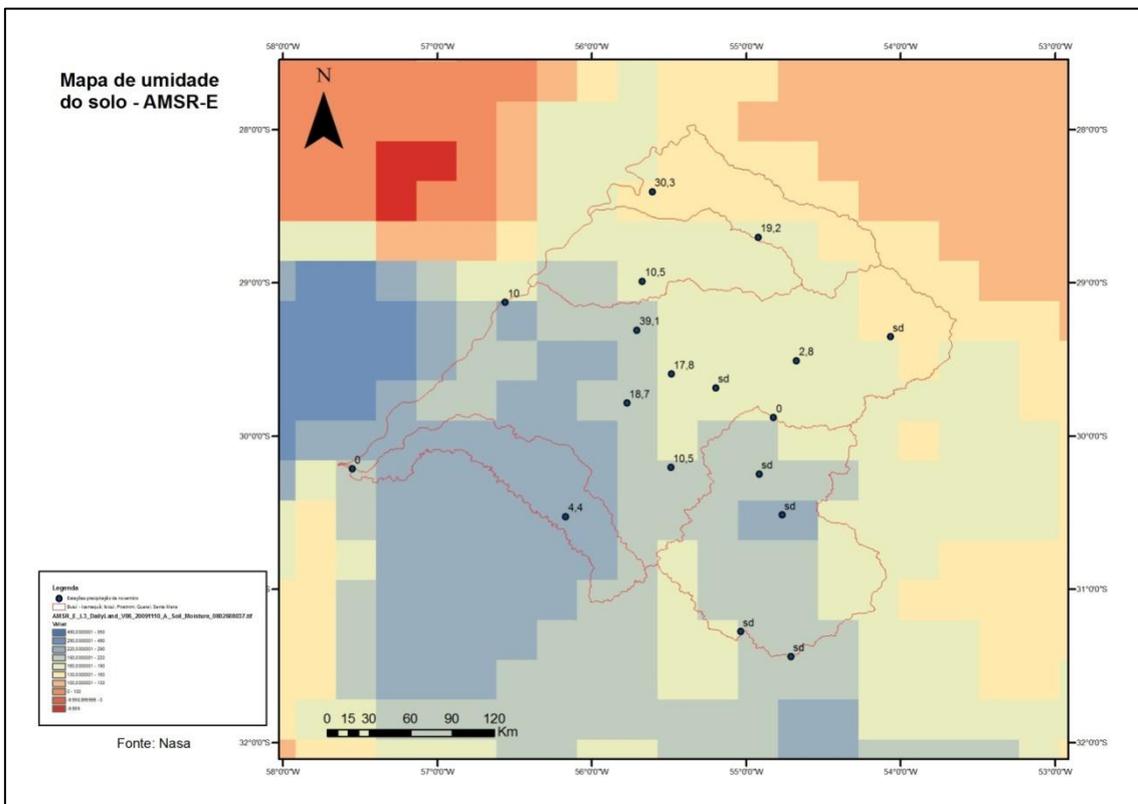


Figura 49 – Mapa de umidade do solo para o dia 10 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

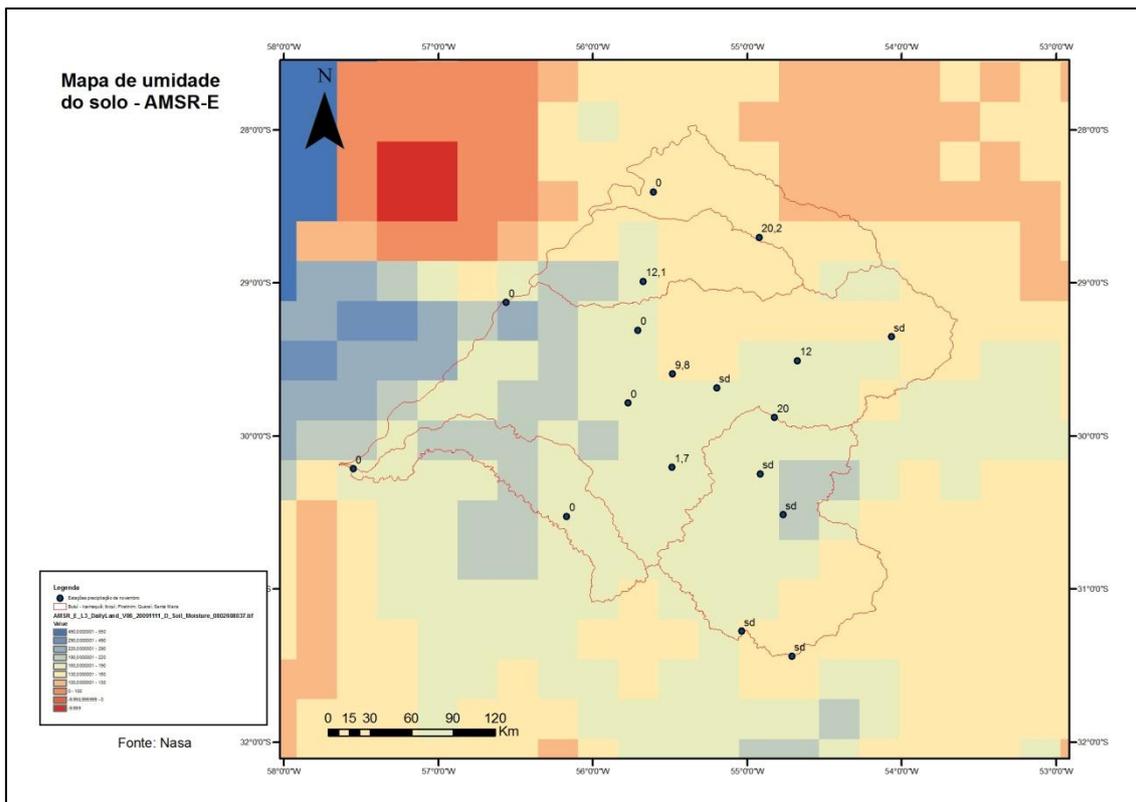


Figura 50 – Mapa de umidade do solo para o dia 11 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

Também é interessante notar que na área tradicionalmente úmida (sul e sudeste), mesmo com precipitação pluvial ausente, a umidade do solo mantém valores mais elevados que em outras áreas da região. A imagem do dia 9 mostra a permanência da umidade nessa área. Vale ressaltar como a precipitação pluvial ocorrida no dia 11 no centro norte, ajuda a distribuir melhor as manchas de umidade pela região. Observa-se que as manchas de umidade ao norte da região nunca se igualam às do sul em intensidade e isso pode se dever ao fato dos solos nessas áreas serem litólicos ou latossolos, assim como não existem grandes corpos de água como no sul e centro da região (rios e reservatórios) (DRH,2010).

Além desse período também foi observado o período dos dias 22 a 24, quando houve alta precipitação pluvial espalhada por toda a região (Figuras 51 e 52). Para a umidade do solo os índices de precipitação desses dois dias podem ter elevado os valores que perduraram por mais alguns dias.

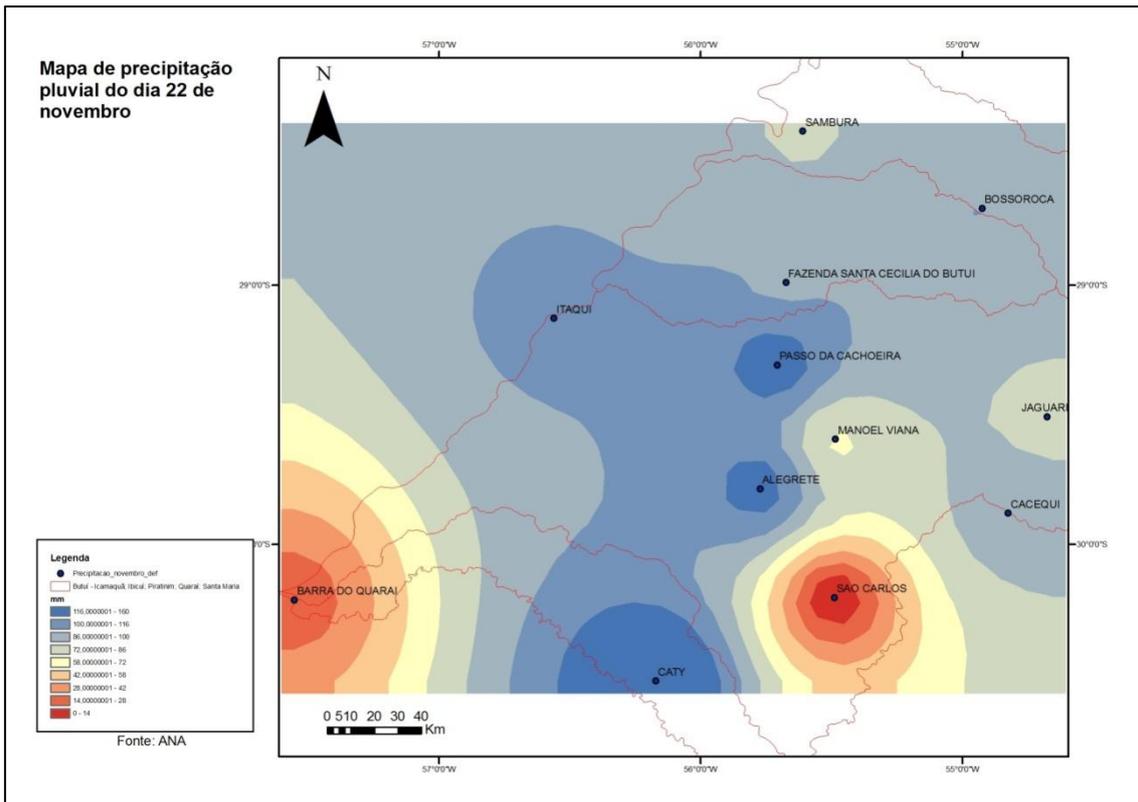


Figura 51 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 22 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

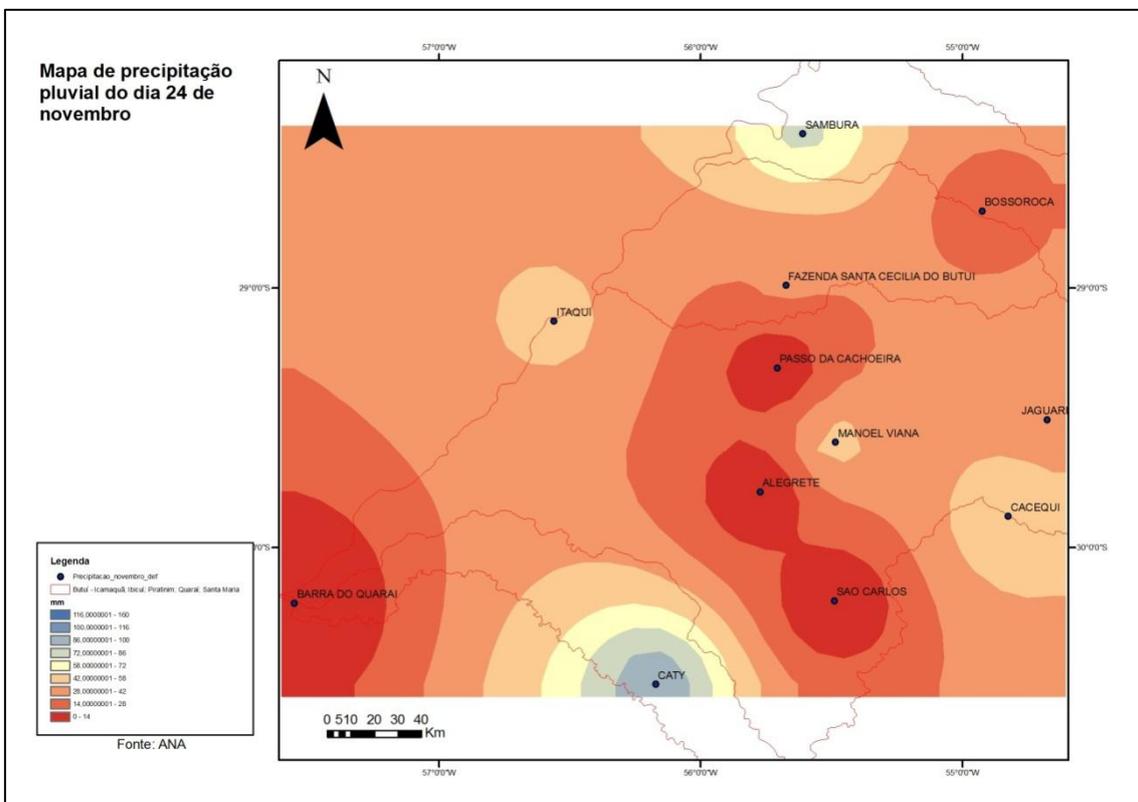


Figura 52 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 24 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

Neste período se observou uma proximidade do comportamento espacial da umidade do solo com a ocorrência de precipitação pluvial como mostram as Figuras 53 à 55. Os períodos anteriores ao dia 27 foram de alta precipitação pluvial, em especial o período do dia 19 ao dia 24 e com isso o armazenamento de água deve ter garantido reservas para os próximos dias, pois apesar de não ter havido precipitação pluvial nos dias 25 e 26, o dia 27 apresenta grandes volumes de umidade no solo como mostra a Figura 53.

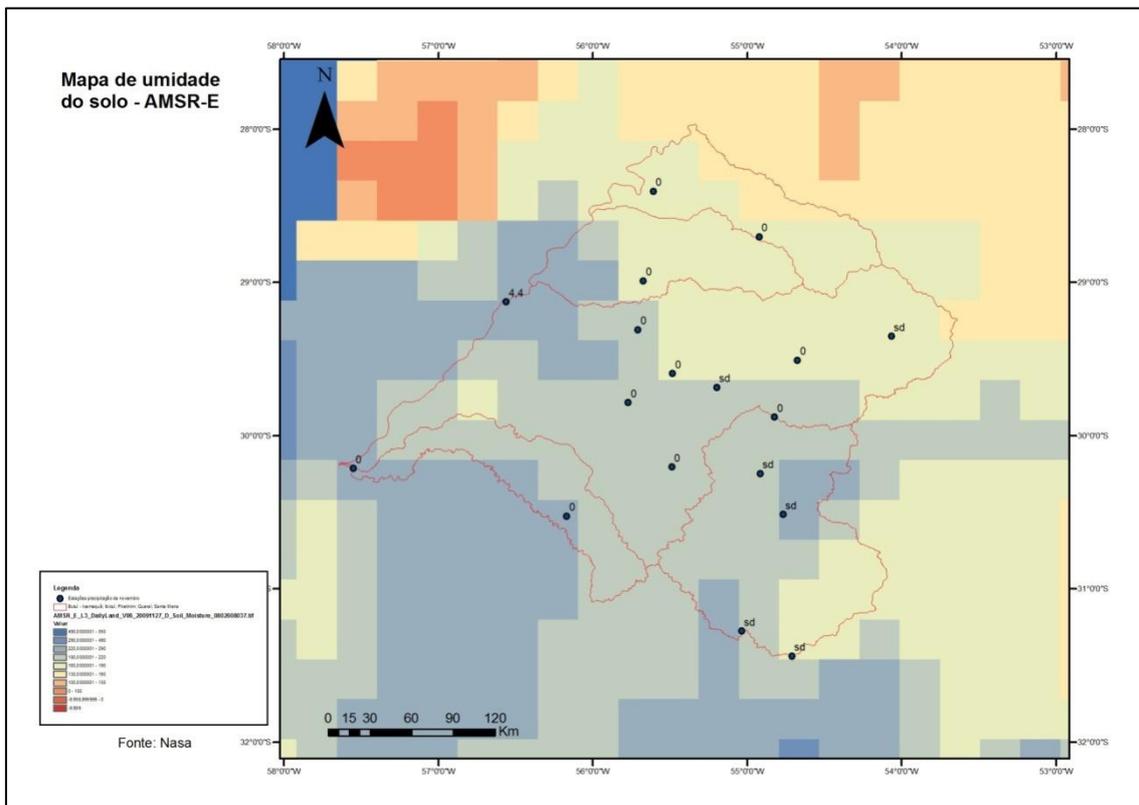


Figura 53 – Mapa de umidade do solo para o dia 27 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

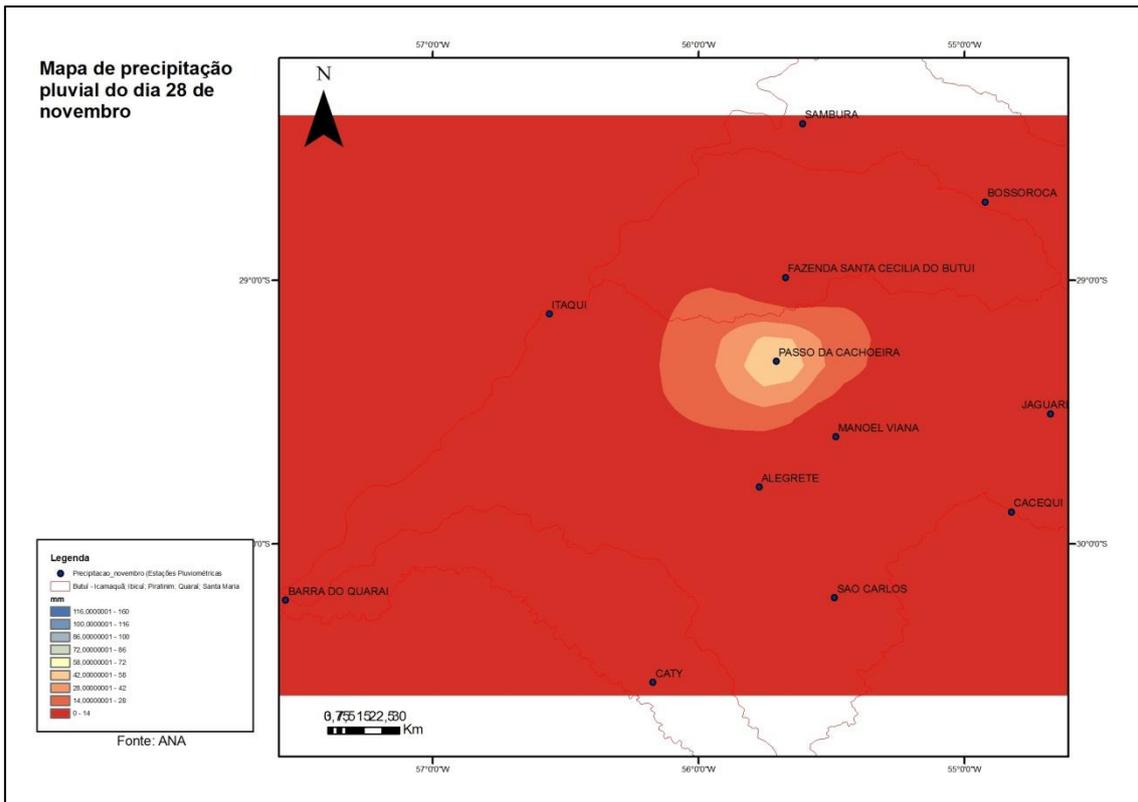


Figura 54 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 28 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

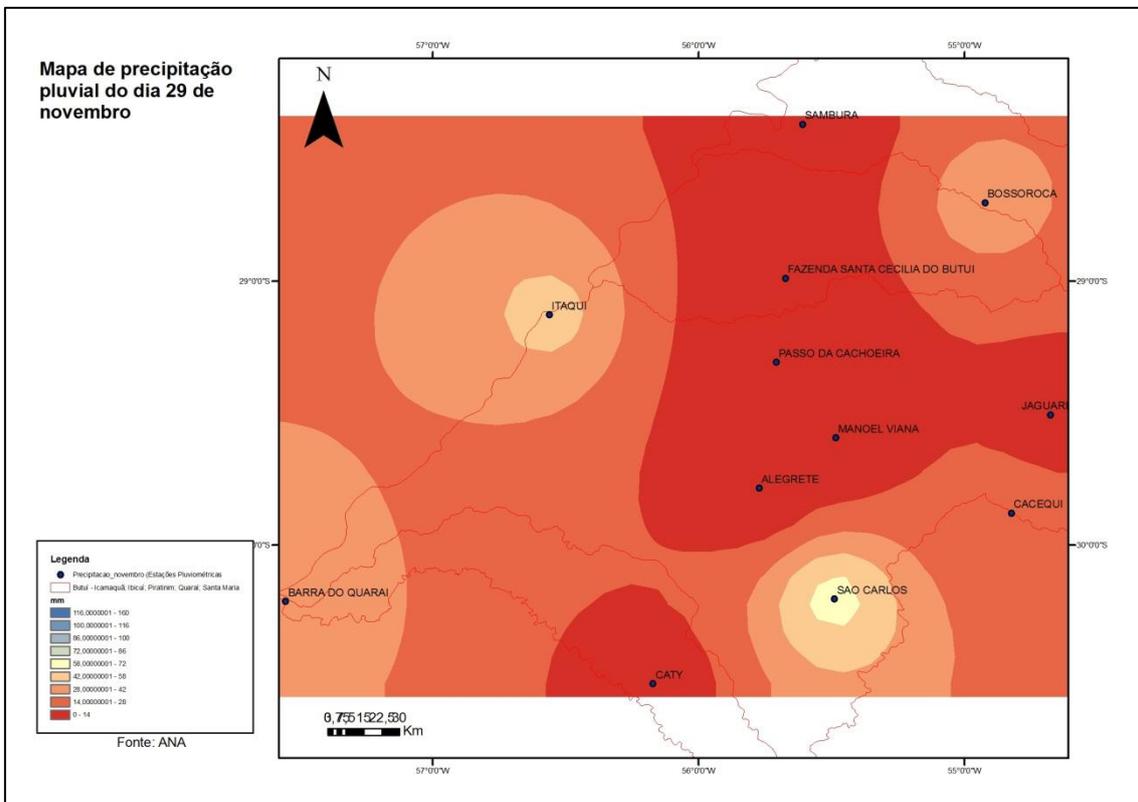


Figura 55 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 29 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

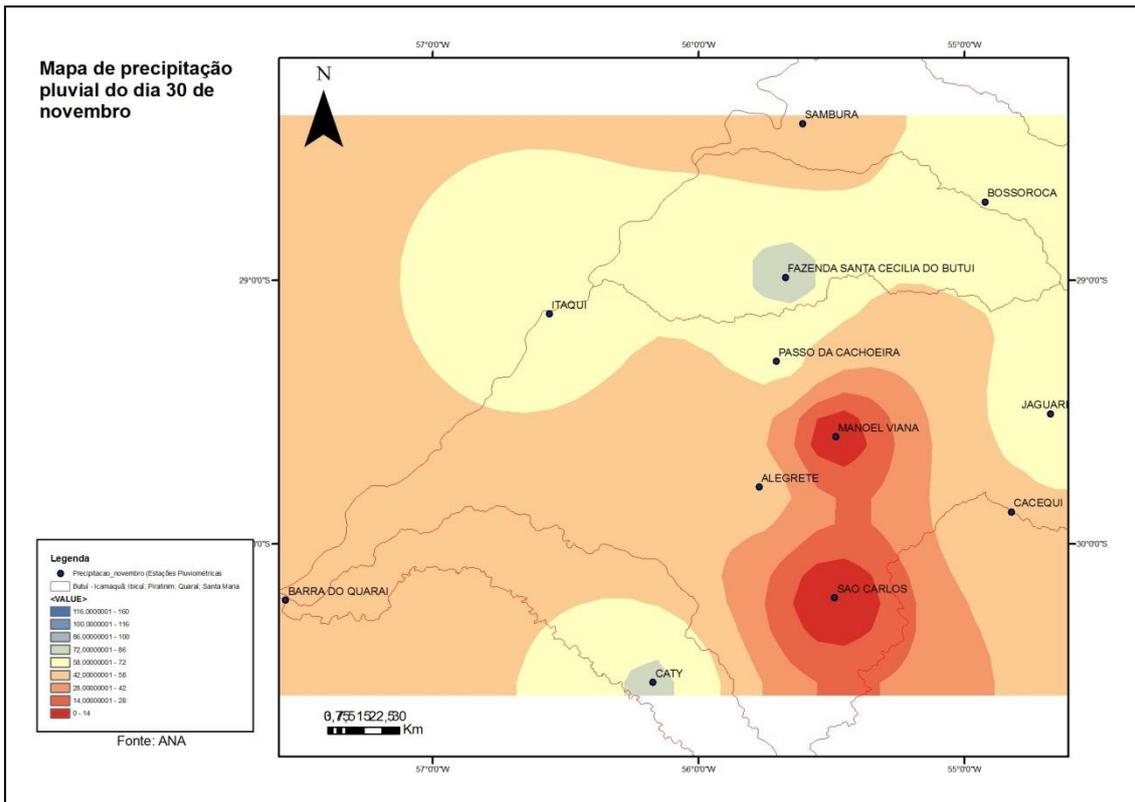


Figura 56 – Distribuição espacial da precipitação pluvial no dia 30 de novembro na área de estudo em 2009. Fonte: ANA (2011)

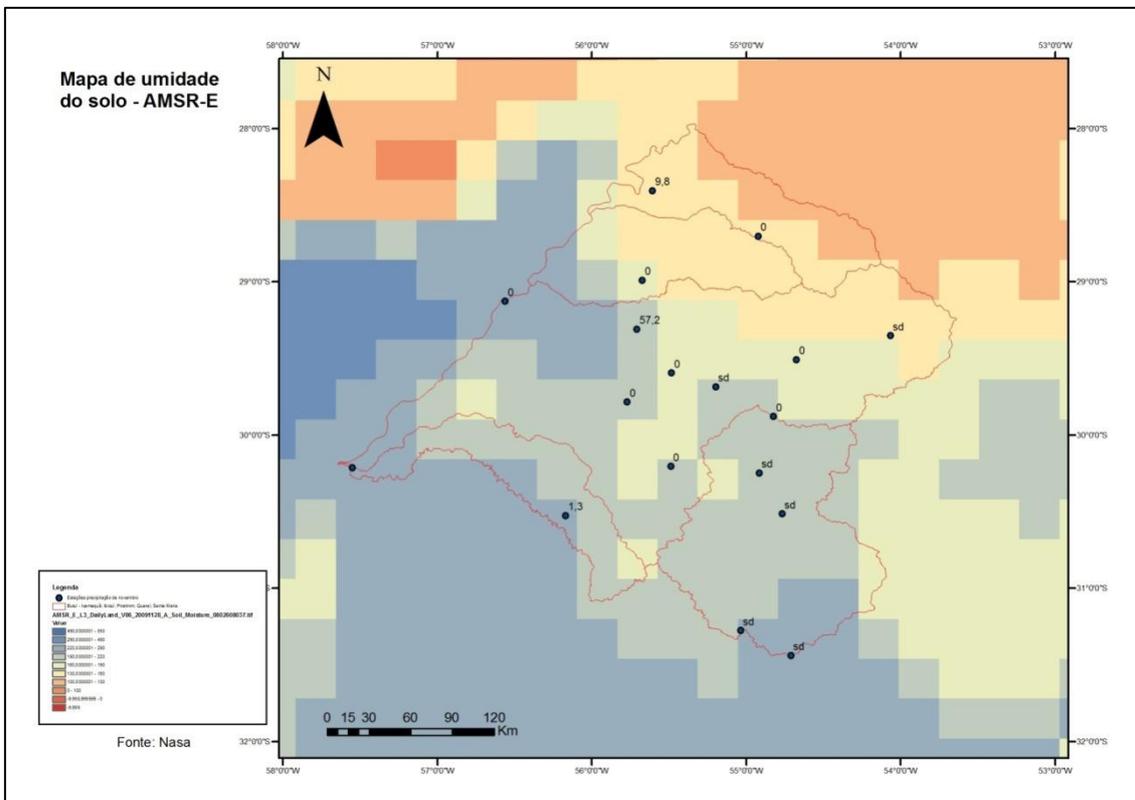


Figura 57 – Mapa de umidade do solo para o dia 28 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

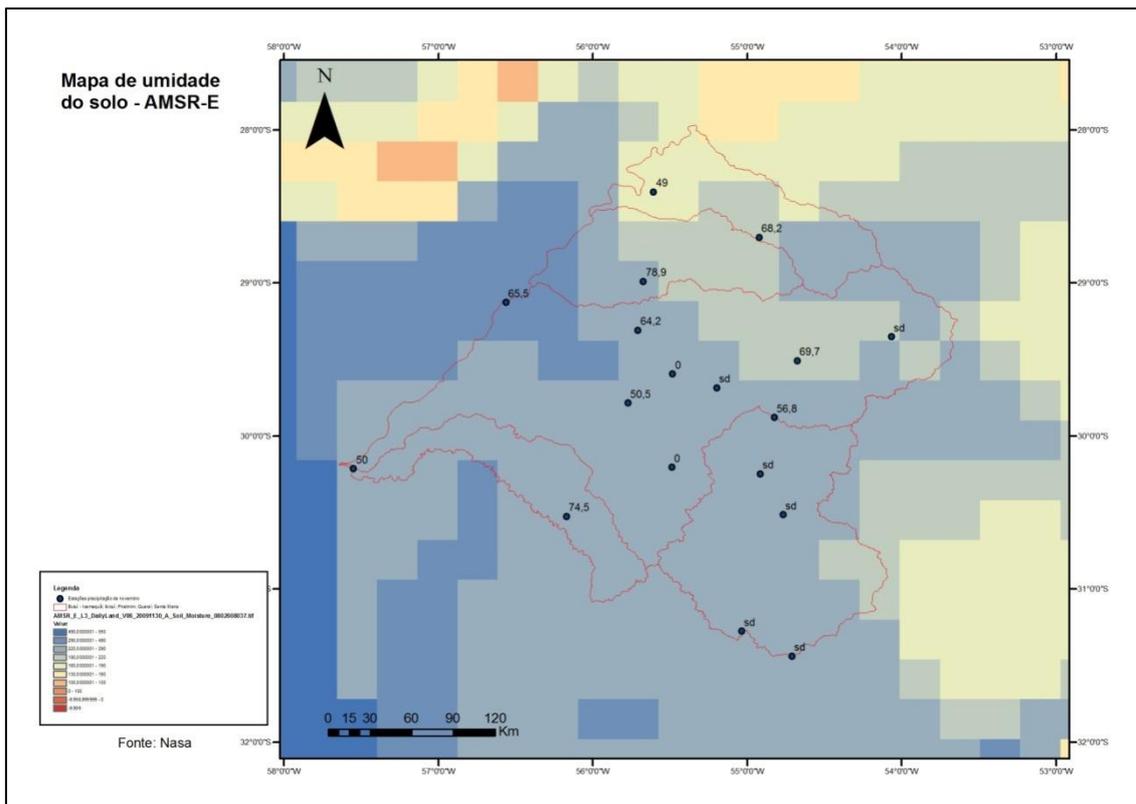


Figura 58 – Mapa de umidade do solo para o dia 30 de novembro de 2009. Fonte: AMSR-E, NASA, 2011.

Observando a evolução da precipitação pluvial, principalmente do dia 28 ao dia 30 (Figuras 54 a 56), verifica-se a modificação intensa da umidade nas cenas das Figuras 57 e 58, culminando com a imagem do dia 30 onde os grandes volumes de umidade do solo definiram as manchas azuis em quase toda a região de estudo. Infelizmente não existem dados de umidade do solo do dia 29, porém se observa que os altos índices de precipitação pluvial na segunda metade do mês de novembro, até 147,2 mm no dia 22 e até 78,9 mm no dia 30, além da constância desses na região fazem a estimativa da umidade do solo, realizada pelo sensor elevar-se em toda a região, principalmente no centro-sul desta.

Em suma, a distribuição espacial da umidade mostrou-se relacionada às precipitações pluviais sobre a área de estudo. Em geral, se observa que em período de menor precipitação pluvial, a umidade do solo acompanhou a queda da mesma e em período de maior precipitação pluvial, a umidade do solo aumentou gradativamente até alcançar uma estabilidade. Não se pode esquecer a influência da textura do solo na retenção de água, onde se sabe que em solos argilosos a água fica retida mais tempo (STRECK, 2002). As relações que se procuraram fazer aqui consideraram os períodos mais críticos, assim como as respostas que os solos puderam dar às precipitações pluviais. Os padrões espaciais verificados foram observados pela visualização das manchas de umidade representadas pelas colorações relacionadas a volume, salientando que a análise não aconteceu numericamente preocupada com a relação entre valores específicos. A observação se deu a partir dos padrões visuais das manchas e a relação

direta com os valores da precipitação pluvial. Interessante observar que na maioria dos casos os valores presentes de precipitação pluvial que foram representados junto às estações nos mapas, guardavam uma relação com o comportamento da umidade do solo presente à área da estação pluviométrica.

Relembrando a análise estatística temporal, pode-se de certa forma afirmar que as umidades do solo estimadas sobre as estações pluviométricas próximas que tiveram ocorrência de precipitação pluvial similar, apresentaram comportamento espacial e temporal muito similar.

Neste estudo pode-se considerar que os padrões observados nas estações escolhidas, acompanharam as precipitações pluviais observadas de forma muito próxima. As estações pluviométricas que serviram de base para avaliar temporalmente o dado de umidade se encontravam espalhadas em áreas de resposta rápida ao sistema atmosférico que age sobre a área de estudo. Além disso, as estações estão sobre terreno representativo da área total. As nuances de modificações da umidade do solo não puderam ser percebidas de forma a correlacioná-las às precipitações pluviais ocorridas de forma mais direta. Porém a percepção de que de certa forma há relações entre os eventos, pode fazer com que análises mais acuradas possam avaliar melhor os dados temporais do sensor e a eventual comparação com os dados de precipitação pluvial. O correto ainda seria comparar dados de umidade do solo detectados diretamente no solo com os dados detectados pelo sensor.

A relação entre a umidade do solo e precipitação foi observado por outros pesquisadores em estudos de modelos de circulação geral (PARAJKA, 2006).

4.4. Considerações Finais

Através da comparação entre os conjuntos de dados de precipitação pluvial da ANA (Agencia Nacional de Águas) com os produtos de umidade do solo derivados do AMSR-E, a bordo do satélite AQUA verificou-se que a umidade do solo proveniente do sensor AMSR-E (banda C) apresentou padrões sazonais e espaciais gerais compatíveis com a precipitação pluvial ocorrida na região de estudo, quando associados com os conjuntos de dados de precipitação da ANA. A relação ocorre para a região escolhida, a qual possui vegetação esparsa ou cobertura de campos, poucas áreas urbanas e relevo suave. Porém, quando se correlacionaram os dados temporais por pixel, verificou-se que esta não era muito satisfatória. As correlações encontradas foram baixas e os períodos de maior aproximação dos picos de valores foram anulados pelos períodos onde os valores não se equivaliam muito.

Neste estudo pode-se verificar que a umidade do solo estimada pode se relacionar ao regime de precipitações pluviais. Percebe-se que a partir da possibilidade de detectar grandes áreas de umidade do solo e a partir daí monitorar constantemente as mesmas pode trazer a possibilidade de detectar mudanças e até prever situações atmosféricas que levem à escassez de água no solo e conseqüentemente à estiagem. Hong e Pan (2000) observaram forte relação entre a umidade do solo e a precipitação pluvial, devido principalmente ao efeito sobre a turbulenta mistura que a entrada de umidade na atmosfera provoca.

Após a análise espacial da umidade da superfície do solo derivada do AMSR-E e da comparação desta com a precipitação pluvial percebe-se que a estimativa da primeira se aproxima do comportamento esperado para os momentos posteriores às precipitações pluviais ocorridas na área de estudo. Observa-se que de maneira genérica, os padrões de resposta às precipitações pluviais como um todo na região acompanharam as mesmas, porém quando se observa pontualmente, pixel a pixel e estação a estação, muitas vezes a correlação entre padrão de umidade do solo e as precipitações pluviais não se verifica tão diretamente. As razões deste fato podem ser de diversas origens, uma vez que o pixel analisado é de grandes dimensões, fazendo com que a umidade do solo se generalize na área deste pixel, os tipos de solos que estão presentes no pixel podem tender a acumular mais água e por isso manter mais tempo a umidade, pode haver influências de corpos hídricos de dimensões consideráveis (como um lago, uma área represada ou um rio de maior tamanho). Verificou-se que os dados resultantes do produto L3 são bastante próximos das situações reais de umidade do solo, no que diz respeito à distribuição espacial.

Houve a constatação de que as correlações temporais para os pixels sobre as estações pluviométricas que apresentaram dados de precipitação pluvial não foram muito altas, caracterizando maior correlação em algumas estações e não na maioria. Cabe estudar mais detalhadamente a associação do sensor com os eventos de precipitação pluvial diariamente para todo um período de vários anos, o que não foi possível neste estudo. Nota-se através da análise dos dados de umidade do solo dos dias

quase consecutivos do mês de maior precipitação pluvial, que o comportamento denunciado por esta, apresenta uma dinâmica específica que à primeira vista se aproxima dos comportamentos da precipitação pluvial. Os padrões de umidade variaram muito próximos dos padrões de precipitação pluvial, notando-se que quando havia maiores períodos de precipitação pluvial acentuada e constante, a resposta na umidade do solo se dava através dos valores detectados pelo sensor. Também no período de menores precipitações houve uma resposta da umidade estimada pelo sensor à variação de precipitação pluvial, porém a correlação estatística tampouco se confirmou no mês de menor precipitação pluvial. O que ressaltou a análise foram as correlações entre os dados de umidade do solo de cada estação. Nesse caso, a alta correlação nos mostra que pode haver uma lógica da estimativa do sensor e da aplicação do algoritmo. Considerando que se uma estação pluviométrica apresenta correlação no seu comportamento com outra estação ou próxima ou com padrões de precipitação similares é porque o sensor consegue detectar as nuances da variação da umidade do solo. Será então interessante verificar em estudo posterior as razões pelas quais as correlações não aconteceram tão diretamente entre a precipitação pluvial ocorrida e a umidade do solo estimada.

O dado analisado foi o dado gerado com a resolução espacial de 25 km, o que pode ser melhorado com o uso de outras bandas com maior resolução, ou até com uso do sensor a bordo de aeroplano como mostraram os estudos do projeto SMEX02 e SMEX03 (ROSSATO, 2010). A qualidade da calibração do modelo é degradada apenas pelos efeitos da escala grosseira (25 km). Na realidade, a ignorância da parametrização verdadeira da equação de transferência radioativa constitui uma importante fonte de erro na recuperação de umidade do solo a partir da banda na frequência 6,9 GHz, especialmente sobre superfícies vegetadas (JACKSON, 1993). Além disso, tanto a rugosidade do solo como o coeficiente de estrutura da vegetação não foi considerada nesta análise. Representações mais detalhadas destes parâmetros de superfície da terra provavelmente aumentariam os efeitos não lineares e a recuperação de erros.

Constata-se que a visualização de manchas de umidade do solo, representadas no seu volume, através de imagens fornecidas quase que diariamente para grandes áreas da superfície terrestre podem ser úteis na caracterização do comportamento desta umidade para períodos principalmente de estiagem. Torna-se imperativo verificar as situações especiais no terreno em que as manchas não acompanharam uma possível resposta à precipitação pluvial.

Infere-se também que o modelo utilizado, o número de estações pluviométricas e a representação dos produtos L3.2 podem não ter sido as melhores escolhas. Os valores de umidade do solo em determinadas áreas não coincidiu com comportamento esperado. Também houve desconexão de comportamentos esperados da umidade do solo em relação à composição dos solos presentes na região de estudo.

Finalmente, os resultados indicam que a umidade do solo derivada do AMSR-E (banda C), obtida a partir do algoritmo LPRM e do produto L3.2, é uma informação

importante que pode ser utilizada para diferentes fins, como o monitoramento da umidade do solo em eventos extremos (cheias/secas em áreas esparsas), ou a ser utilizado para validação e calibração de modelos, ou como entrada, no âmbito da assimilação de dados em modelos de previsão numérica de tempo. Além disso, este estudo é um primeiro passo para conhecimento da qualidade dos produtos AMSR-E sobre a América do Sul, mais especificamente sobre o Rio Grande do Sul. Estudos complementares, incluindo a avaliação da umidade do solo por longos períodos, bem como a obtenção de dados de umidade do solo *in situ*, são necessários para melhor controlar os padrões sazonais de umidade do solo ao longo do território gaúcho, bem como para validar os produtos obtidos a partir sensoriamento remoto.

5. Conclusões

Considerando a análise realizada sobre a variação temporal dos dados de umidade do solo oriundos do sensor AMSR-E, conclui-se que:

- Existe associação entre os padrões de variação temporal da umidade do solo e da precipitação pluvial ocorrida, o que ficou demonstrado através dos coeficientes de correlação significativos para a maioria das estações avaliadas;
- Os padrões de distribuição espacial da umidade do solo são similares e consistentes com os padrões espaciais de precipitação pluvial.
- Em período chuvoso (mês de novembro), os coeficientes de correlação entre a umidade do solo e a precipitação pluvial ocorrida, na maioria das estações observadas, são significativos, o que permite afirmar que existe resposta do sensor à umidade do solo nesta condição.
- Em período seco (mês de abril), há diferenças substanciais entre a precipitação pluvial ocorrida e os dados medidos pelo sensor para as áreas de algumas estações pluviométricas observadas, o que não pode ser explicado pelas razões analisadas neste estudo.

No mês de menor precipitação, as explicações para a falta de correlação entre a precipitação pluvial registrada e a umidade do solo, em algumas estações podem estar em aspectos de origem externa à área de estudo, ou em aspectos não considerados no modelo utilizado para gerar o produto do sensor AMSR-E utilizado. Também é importante ressaltar aqui que a falta de correlação dos dados no mês de abril se deve em grande parte à falta de dados contínuos de precipitação pluvial, fazendo com a análise estatística seja prejudicada. Para reforçar essa idéia, pode-se observar a correlação existente entre os dados coletados pelo sensor para cada estação que apresentou o mesmo comportamento pluviométrico.

No mês de maior volume de precipitação pluvial, as estimativas de umidade do solo apresentam resposta maior em termos de molhamento do solo do que nos períodos de menor precipitação pluvial, o que indica a necessidade de melhorar a análise deste produto para monitoramento de estiagem, principalmente utilizando um produto que incorpore os parâmetros locais de solo e cobertura vegetal.

Quanto à distribuição espacial, a similaridade entre os dois índices analisados, mostrou que existe relação entre o que acontece com a movimentação dos eventos de precipitação pluvial e as variações da umidade solo, com exceção de algumas áreas e de alguns períodos, caracterizando os dados do sensor como dados de percepção do comportamento da umidade em grandes áreas da superfície terrestre. Também se observou a equivalência entre o comportamento da umidade do solo ao longo do

território e o tipo de solo, onde se pode caracterizar relação entre os solos que detêm mais umidade e a manutenção desta, ao longo período analisado.

Portanto, o uso dos produtos do sensor AMSR-E possui um grande potencial para detecção da umidade do solo, podendo ser usado para monitorar o comportamento do mesmo. Importante recordar que este estudo foi realizado com um produto mais elaborado, resultante da estimativa do sensor AMSR-E em condições gerais, considerando parâmetros globais de cobertura vegetal, tipos de solo e outros parâmetros utilizados no produto. Este produto pode fornecer informações desajustadas em relação à realidade observada localmente. Também, há que se considerar a análise da região escolhida, que não permite muitas vezes estabelecer causas diretas, pois estas podem ser de ordem externa à própria região. E somando a isso, tem-se a questão da umidade do solo responder mais lentamente à precipitação pluvial em determinados tipos de solo, o que dificulta o entendimento do comportamento traçado pela detecção do sensor ao longo da semana e do dia.

6. Recomendações

Baseado nas conclusões anteriores e apontando algumas necessidades de aprofundamento do estudo de validação e uso do sensor AMSR-E indicam-se algumas ações interessantes para trabalhos futuros:

- validar os dados do sensor com dados de medições a campo de umidade de solo com adequada representatividade;
- uso dos dados brutos do nível 2 com aplicação de algoritmos considerando a cobertura vegetal e as condições físicas do território gaúcho;
- realizar um estudo histórico da umidade do solo derivada a partir das observações em microondas para melhor avaliar o modelo LPRM, a fim de verificar se o modelo superestima ou subestima a umidade do solo em diferentes tipos de cobertura vegetal e diferentes condições (anos de El Niño/La Niña);
- implementar uma avaliação mais detalhada do LPRM considerando inclusão das propriedades físicas do solo extraídas do Levantamento e Reconhecimento de Solos da EMBRAPA e do Projeto RADAMBRASIL para todo o período do ano de 2009, observando as diferenças da umidade do solo em cada sítio selecionado para o presente estudo;
- fazer a validação dos outros índices coletados pelo sensor como a temperatura da superfície e profundidade ótica;
- realizar o teste com outros sensores que detectem microondas, principalmente os de nova geração.

Bibliografia

ANA - Agência Nacional de Águas. **Rede hidrometeorológica**. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/portalsnrh/>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

CASTRO, A. L. C. et al. In situ soil moisture network for validation of remotely sensed data, In: INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, 4., 2004, Anchorage. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2004.

CHOUDHURY, B. J. et al. Effect of surface roughness on the microwave emission from soils. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 84, n. C9, p. 5699–5706, 1979.

DE JEU, R.A.M., and M. Owe. Estimating Spatially Averaged Surface Soil Temperature for Microwave Surface Moisture Derivation. *Remote Sensing of Environment*. Vrije Universiteit, Amsterdam, 2002.

DE JEU, R. A. M. **Retrieval of land surface parameters using passive microwave remote sensing**. 2003. 122 f. Thesis (Doctorate) - Vrije Universiteit, Amsterdam, 2003.

DE JEU, R. A. M. **Detecting changes in global land surface characteristics with long term satellite**. Amsterdam: Vrije Universiteit, 2004.

DE JEU, R.; DRAPER, C. S. **Remotely sensed soil moisture over Australia from AMSR-E**. Disponível em: <<http://users.monash.edu.au/~username/>>. Acesso em: 15 mar. 2011

DE WIT A. J. W.; VAN DIEPEN, C. A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 146, p. 38-56, 2007.

DOBSON, M. C. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil - part II: dielectric mixing models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 23, p. 35-46, 1985.

DRAPER, C. S. et al. **Remotely sensed soil moisture over Australia from AMSR-E**. Disponível em: <<http://users.monash.edu.au/~jpwalker/papers/modsim07-4.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2011.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999.

ENTIN, J. K. et al. Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 105, n. 11, p. 865-877, 2000.

FEPAGRO. **Boletim agrometeorológico de 2009**. Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://www.agrometeorologia.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 mar. 2011.

FU, C. C. et al. **User's guide for the nimbus-7 scanning multichannel microwave radiometer (SMMR) CELL-ALL tape**. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1988. (NASA Reference Publication, 1210).

GIAROLLA, A. **Estimativa remota de umidade superficial de solos do cerrado: possibilidades e futuro**. Brasília: EMBRAPA, 2006.

GLOERSEN, P.; BARATH, F. T. A scanning multichannel microwave radiometer for Nimbus-G and Seasat-A. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, New York, v. 2, p. 172-178, 1977.

HALLIKAINEN, M. T. et al. Microwave dielectric behavior of wet soil – part I: empirical models and experimental observations. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 23, p. 25-34, 1985.

HOLMES, T. R. H. et al. A global simulation of microwave emission: Error structures based on output from ECMWF's operational Integrated Forecast System, **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, New York, v. 46, p. 846-856, 2008.

HONG, S.-Y.; PAN, H.-L. Impact of soil moisture anomalies on seasonal, summertime circulation over North America in a regional climate model, **Journal of Geophysical Research**, Washington, v. 105, n. 29, p. 625-634, 2000.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística & EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2001. **Mapa de Solos do Brasil**. Escala 1: 5.000.000, Rio de Janeiro.

JACKSON, T. J. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 7, p. 139-152, 1993.

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency. **AMSR-E Data Users Handbook**. 2006. Disponível em: <http://www.eorc.jaxa.jp/en/hatoyama/amsr-e/amsr-e_handbook_e.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2010.

JENSEN, J. R. . **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. Prentice Hall: Saddle River, N.J, 2000.

KOIKE, T., Y. NAKAMURA, I. KAIHOTSU, G. Davva, N. Matsuura, K. Tamagawa e H. Fujii, Desenvolvimento de um micro-ondas Advanced Scanning Radiometer (AMSR-E) Algoritmo de Umidade do Solo e da Água e Vegetação. Conteúdo da **Annual Journal of Hydraulic Engineering**, JSCE, vol. 48(2), pp217-222, 2004. 48 (2), pp217-222, 2004.

KUMMEROW, C.; BARNES, W.; KOZU, T.; SHIUE, J.; SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Sensor Package. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 15, n. 3, 809–817, 1998.

LEPSCH, Igo F. **FORMAÇÃO E CONSERVAÇÃO DOS SOLOS**. 2. ed. São Paulo: Oficina Das Letras, 170 p. 2010.

LOEW, A., T. Holmes, and R. de Jeu. The European Heat Wave 2003: Early Indicators from Multisensoral Microwave Remote Sensing? **Journal of Geophysical Research** 114(D05103), doi: 10.1029/2008JD010533. 2009.

MEESTERS, A.G.C.A.; De Jeu, R.A.M.; Owe, M.; **Analytical derivation of the vegetation optical depth from the microwave polarization difference index**. Dept. of Hydrology & Geo-Environ. Sci., Vrije Univ. Amsterdam, Netherlands. 2006.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Glossário de Defesa Civil: estudos de riscos e medicina de desastres**. Brasília: MIN, 283p. 1998.

MO, T., CHOUDHURY, B. J., SCHMUGGE, T. J., AND JACKSON, T. J. (1982). A model for microwave emission from vegetation-covered. **Journal of Hydrology**, 184:101–129. 1982.

NASA. <<http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/AMSR/>>. Acesso em: 10 ago. 2011.

NJOKU, E. G.; ENTEKHABI, D. Passive microwave remote sensing of the soil moisture. **Journal of Hydrology**, 184:101-129, 1996.

NJOKU, Eni. 2008, atualizado diariamente. **AMSR-E/Aqua Daily L3 superfície Soil Moisture, parâmetros interpretativos**, e QC-EASE Grades V002, [lista das datas dos dados utilizados]. Boulder, Colorado EUA: Centro Nacional de Dados de Gelo e Neve. A mídia digital. 2008.

OWE, M. and Van de Griend, A. A. (1998). **Comparison of soil moisture penetration depths for several bare soils at two microwave frequencies and implications for remote sensing**. Water Resources Research, 34:2319–2327. 1998.

OWE, M. and Van de Griend, A. A. (2001). On the relationship between thermodynamic surface temperature and high frequency (37 GHz) vertically polarized brightness temperature under semi-arid conditions. **International Journal of Remote Sensing**, 22:3521–3532. 2001.

OWE M., RAM. De Jeu, and TRH Holmes. Multi-Sensor Historical Climatology of Satellite-Derived Global Land Surface Moisture, **J. Geophys. Res.**, 113, F01002, doi:1029/2007JF000769. 2008.

PARAJKA, J, V Naeimi, G Bloschl, W Wagner, R Merz, and K Scipal. (2006). Assimilating scatterometer soil moisture data into conceptual hydrologic models at the regional scale. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, 10, 353–368. 2006.

RIO GRANDE DO SUL. SECRETARIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. **Relatório anual de recursos hídricos 2008**. Porto Alegre: Departamento de Recursos Hídricos da Secretaria Estadual de Meio Ambiente, 2008 <<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, Manole, 188p. 1990.

REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. **Propriedades física do solo**. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/fisicadosolo>>. Acesso em: 15 jul. 2011.

ROSSATO, Luciana. **ESTIMATIVA DA UMIDADE SUPERFICIAL DO SOLO A PARTIR DE SENSORIAMENTO REMOTO POR MICROONDAS PASSIVA SOBRE A AMÉRICA DO SUL**. 2010. 300 f. Tese (Doutorado) - Curso de Meteorologia, Inpe, São José Dos Campos, 2010.

SEPLAG, Secretaria Estadual de Planejamento e Gestão. <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas>>. Acesso em: 10 dez. 2010.

SILVA, Érica Lemes da. **Análise multi-temporal da temperatura da superfície do mar (TSM) através de imagens do sensor Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) do Oceano Atlântico Sudoeste no ano de 2005**. 2006. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Do Vale Do Paraíba, São José Dos Campos, 2006.

SOUZA, R. A. F.; BASTOS, E. J. B.; ALVALÁ, R. C. S. Land surface emissivities for Brazil from SSM/I observations. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, 11., 16-20 out. 2000, Rio de Janeiro. Anais... CD-ROM. 2000.

SHUKLA, J., and Y. Mintz, Influence of land–surface evapotranspiration on the earth’s climate, **Science**, 215, 1498–1501, 1982.

SCHMUGGE, T. J. e Jackson, T. J. Mapping Surface Soil Moisture with Microwave Radiometers. ***Meteorol. Atmosphere Phys.***54, 213-223, 1994.

SCHMUGGE, T., **Measurements of surface soil moisture and temperature, In Remote Sensing of Biosphere Functioning** (R.J. Hobbs, and H.A. Mooney, Eds.). Springer-Verlag, New York .1990.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. EMATER/RS; UFRGS, Porto Alegre, 2002.

THEIS, S. W. and A. J. BLANCHARD, "The Effect of Measurement Error and Confusion from Vegetation on Passive Microwave Estimates of Soil Moisture" **Presented at the URSI Commission F Symposium, Durham**, New Hampshire, July 28-August 1, 1986.

ULABY, F. T., MOORE, R. K., AND FUNG, A. K. Microwave Remote Sensing - Active and Passive. **Vol. III: From Theory to Applications. Readings**, Dedham (MA),USA: Adisson-Wesley, 1986.

UNITED STATES. National Drought Mitigation Center. **What is drought?** Lincoln, 2011. Disponível em: <<http://www.drought.unl.edu/>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

WANG J., and SCHMUGGE T., An empirical model for the complex dielectric permittivity of soils as a function of water content, **IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, 18, 288-295, 1980.

WEN, J.; SU, Z.; MA, Y. Determination of land surface temperature and soil moisture from tropical rainfall measuring mission/microwave Imager remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 108, NO. D2, 4038, doi:10.1029/2002JD002176, 2003.

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.

VAN OEVELEN, P. J.. Estimation of Areal Soil Water Content through Microwave Remote Sensing. PhD thesis, Wageningen University, the Netherlands, 2000.

VIEIRA, Eurípedes Falcão, **Rio Grande do Sul – Geografia Física e Vegetação**, Ed. Sagra, Porto Alegre, 1984 .

VILLAGRA, M. M.; BACCHI, O. O. S.; TUON, R. L.; REICHARDT, K. Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation. **Agriculture and Forest Meteorology**, v. 72, p. 317-325, 1995.