



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS LABOMAR
BACHARELADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

ALEXSANDROV RAMOS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
DADOS *IN SITU* E ESTIMADOS PELO SATÉLITE SMOS/SENSOR MIRAS**

FORTALEZA

2025

ALEXSANDROV RAMOS DA SILVA

AVALIAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
DADOS IN SITU E ESTIMADOS PELO SATÉLITE SMOS/SENSOR MIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Antônio Geraldo Ferreira

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S578a Silva, Aleksandrov Ramos da.
Avaliação da umidade do solo no estado do Ceará utilizando dados in situ e estimados pelo satélite
SMOS/SENSOR MIRAS / Aleksandrov Ramos da Silva. – 2025.
40 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do
Mar, Curso de Ciências Ambientais, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. Antonio Geraldo Ferreira.
1. Umidade do solo. 2. SMOS. 3. Sensoriamento remoto. 4. Sensor MIRAS. I. Título.
CDD 333.7
-

ALEXSANDROV RAMOS DA SILVA

AVALIAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO NO ESTADO DO CEARÁ UTILIZANDO
DADOS *IN SITU* E ESTIMADOS PELO SATÉLITE SMOS/SENSOR MIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Ciências Ambientais.

Aprovado em: 13/03/2025.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Antônio Geraldo Ferreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará

Dr. Francisco das Chagas Vasconcelos Junior (Examinador Externo)
FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

Dra. Karinne Reis Deusdará Leal (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

À toda minha família e amigos.

AGRADECIMENTOS

À Deus por ter abençoado todos os meus passos durante essa longa jornada.

Aos meus pais, pelo amor incondicional e pelo apoio em cada passo desta jornada acadêmica

À minha família, por sempre ter acreditado no meu potencial.

À Universidade Federal do Ceará, por me proporcionar a realização de um sonho.

Ao meu orientador Antônio Geraldo Ferreira pela paciência e flexibilidade, o senhor foi fundamental para o meu amadurecimento pessoal e acadêmico.

Aos meus professores Michael Viana, Juliana Melo, Paulo Henrique, Luís Hernandez, Marcelo Moro, por terem sido excelentes profissionais que contribuíram muito para a minha formação profissional.

À minha querida esposa, Adrielly Rodrigues das Chagas que esteve comigo desde o início dessa jornada.

À banca avaliadora pelas valiosas contribuições para o aperfeiçoamento do meu trabalho.

“Seja aventureiro, audaz, mas aprecie. Passa rápido”

(Capitão Fantástico)

RESUMO

A umidade do solo é um importante parâmetro que influencia na hidrologia de uma região, através dela é possível gerenciar melhor o uso da água e compreender eventos de seca e inundação. O estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, tem seu território predominantemente situado na região semiárida e que sofrem com a seca por possuírem altas temperaturas e precipitações concentradas em poucos meses no ano. Dessa forma, esse estudo procurou comparar os dados de umidade do solo do satélite SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)/Sensor MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis), por fornecer dados com alta resolução temporal e espacial, com dados de estações *in situ*, das cidades Catarina, Crato, Forquilha, Guaraciaba do Norte, General Sampaio, Jaguaribe, Mauriti, Pentecoste, Quixeramobim e Umari, localizadas no estado do Ceará. A metodologia consistiu em comparar os dados diários de sensores *in situ* de 10 estações do CEMADEM com sensores remotos do satélite SMOS, utilizando o coeficiente de correlação r de Pearson, BIAS e o RMSE. Os gráficos de série temporal mostraram um comportamento semelhante entre os valores de umidade do solo estimada pelo satélite SMOS, com os coletados pelas estações *in situ* e precipitação. Das 10 estações analisadas, 2 foram descartadas (Catarina e Umari) da análise estatística, pois apresentaram valores entre 0,20 e 0,50 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ de umidade do solo no período seco da região, isso demonstra forte indício de falta de calibração dos equipamentos de monitoramento *in situ*. Das 8 estações, 5 foram classificadas com forte correlação pelo coeficiente r de Pearson, enquanto 3 foram classificadas como moderada. Através do BIAS pode-se determinar que o SMOS subestimou os dados de umidade do solo para 6 das 8 estações de análise. Já pelo RMSE os valores variaram entre 0,04 e 0,06, atestando a boa acurácia dos dados estimados pelo SMOS.

Palavras-chave: Umidade do solo, SMOS, Sensoriamento remoto, Sensor MIRAS

ABSTRACT

Soil moisture is an important parameter that influences the hydrology of a region. Through it, it is possible to better manage water use and understand drought and flood events. The state of Ceará, located in the Northeast of Brazil, has its territory predominantly located in the semiarid region and suffers from drought due to high temperatures and precipitation concentrated in a few months of the year. Thus, this study sought to compare soil moisture data from the SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity)/MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) satellite, which provides data with high temporal and spatial resolution, with data from in situ stations in the cities of Catarina, Crato, Forquilha, Guaraciaba do Norte, General Sampaio, Jaguaribe, Mauriti, Pentecoste, Quixeramobim and Umari, located in the state of Ceará. The methodology consisted of comparing daily data from in situ sensors of 10 CEMADEM stations with remote sensors from the SMOS satellite, using Pearson's r correlation coefficient, BIAS and RMSE. The time series graphs showed a similar behavior between the soil moisture values estimated by the SMOS satellite, with those collected by the in situ and precipitation stations. Of the 10 stations analyzed, 2 were discarded (Catarina and Umari) from the statistical analysis, as they presented values between 0.20 and 0.50 $\text{m}^3.\text{m}^{-3}$ of soil moisture during the dry season of the region, which strongly indicates a lack of calibration of the in situ monitoring equipment. Of the 8 stations, 5 were classified as having a strong correlation by Pearson's r coefficient, while 3 were classified as moderate. Through BIAS, it was possible to determine that SMOS underestimated the soil moisture data for 6 of the 8 analysis stations. By RMSE, the values varied between 0.04 and 0.06, attesting to the good accuracy of the data estimated by SMOS.

Keywords: Soil Moisture, SMOS, Remote sensing, MIRAS sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – O espectro eletromagnético	16
Figura 2 – Satélite SMOS.....	20
Figura 3 – Mapa global de dados de umidade do solo e salinidade da superfície do mar.....	20
Figura 4 – Mapa das mesorregiões do Ceará.....	22
Figura 5 – Localização das estações de umidade do solo <i>In situ</i>	23
Figura 6 – Órbitas ascendentes e descendentes do satélite SMOS sobre o estado do Ceará....	24
Figura 7 – Série temporal diária das orbitas ascendente (a), descendente (b) e união das orbitas (c) do SMOS, umidade do solo <i>In situ</i> e precipitação.. ..	28
Figura 8 – Gráficos de dispersão do SMOS e estações CEMADEM <i>In situ</i>	29
Figura 9 – Série temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo <i>In situ</i> , e precipitação dos municípios com correlação entre 0,8 e 0,9.....	31
Figura 10 – Série temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo <i>In situ</i> , e precipitação dos municípios com correlação entre 0,7 e 0,8.....	32
Figura 11 – Série temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo <i>In situ</i> , e precipitação dos municípios com correlação entre 0,5 e 0,69	33
Figura 12 – Série temporal e gráfico de dispersão dos municípios com baixa correlação	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Localização e mesorregião das estações de interesse	23
Tabela 2 – Classificação das correlações	25
Tabela 3 – Dados estatísticos da umidade do solo SMOS e estações in situ.....	26
Tabela 4 – Dados estatísticos das órbitas SMOS	27
Tabela 5 – Dados estatísticos BIAS e RMSE.....	35

LISTA DE ABREVIACÕES

AMSR	Advanced Microwave Scanning Radiometer
BEC	Barcelona Expert Center
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
ESA	European Space Agency
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GLACE	Global Land–Atmosphere Coupling Experiment
MIRAS	Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis
NEB	Nordeste brasileiro
RMSE	Raiz do Erro Desvio Quadrático Médio
SAR	Radares de Abertura Sintética
SMOS	Soil Moisture and Ocean Salinity
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVO.....	15
2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	15
2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	15
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
3.1	<i>Princípios de Sensoriamento remoto.....</i>	15
3.2	<i>Umidade do solo.....</i>	17
3.3	<i>Sensoriamento remoto aplicado à umidade do solo.....</i>	18
3.4	<i>Missão SMOS.....</i>	19
4	ÁREA DE ESTUDOS, DADOS E METODOLOGIA.....	21
4.1	<i>Área de estudo.....</i>	21
4.2	<i>Dados In situ de umidade do solo e precipitação.....</i>	23
4.3	<i>Dados SMOS.....</i>	23
4.4	<i>Extração da umidade do solo via SMOS.....</i>	24
4.5	<i>Análise estatística.....</i>	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
5.1	<i>Análise das orbitas SMOS.....</i>	26
5.2	<i>Análise da Série Temporal Diária.....</i>	28
5.3	<i>Análise estatística.....</i>	34
6	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A seca climatológica pode ser definida como a deficiência do total de chuvas que precipita em determinado lugar. Esse fenômeno é causado pela circulação natural da atmosfera terrestre e pode ocasionar na falta de água necessária para agricultura e abastecimento de água para a população (Campos; Stuart, 2001). O nordeste brasileiro (NEB) é composto majoritariamente por regiões semiáridas. Essas regiões possuem precipitações médias anuais iguais ou inferiores a 800 milímetros concentrados em um período de 3 a 5 meses do ano (Marengo *et al.*, 2008)

Segundo Cook (2020) as alterações climáticas na forma de falta de chuva, altas taxas de evaporação e temperaturas elevadas podem agravar a seca no nordeste brasileiro impactando diretamente na produtividade agrícola e segurança alimentar da região. Além disso, a agricultura é um dos principais meios de subsistências para muitos povos que residem no NEB, com o aumento da temperatura o nordeste se tornará mais árido com o tempo forçando a população com menos recurso a migrar para cidades em busca de melhores condições de vida. Esse tipo de situação acarretará no aumento de problemas sociais e econômicos já presente nas capitais (Marengo *et al.*, 2021).

Nesse contexto, é fundamental que haja métodos que otimizem o uso da água. O parâmetro de umidade do solo está diretamente ligado ao desenvolvimento das plantas e no entendimento da hidrologia de uma região. O monitoramento da umidade do solo fornece dados que são utilizados no manejo de irrigação, quantidade de água ideal para o cultivo e saturação do solo (Leão *et al.*, 2021). São utilizados vários métodos para determinar a umidade do solo, o mais comum é o gravimétrico, que consiste na diferença da pesagem da amostra do solo seco e molhado. Outro método amplamente utilizado é do uso de sensores de capacitância, esse modo mais moderno é capaz de registrar dados em diferentes profundidades e intervalos de tempo, através de sondas instaladas no solo (Lima *et al.*, 2012; Santos, 2011).

Apesar dos equipamentos convencionais apresentarem alta precisão, as estações só coletam dados pontuais, entretanto, a umidade do solo é um parâmetro com grande variabilidade espaço-temporal, por isso o uso de sensoriamento remoto se torna uma alternativa viável. O uso de sensores remotos óptico e térmico para coletar dados de umidade do solo apresentou limitações ao longo dos anos, por conta dos efeitos de interferência de nuvens e cobertura vegetal (Zhang; Zhou, 2016). Dessa forma, o uso da banda do micro-ondas se mostrou ideal devido ao contraste das propriedades dielétricas do solo e da água, além de que as nuvens e vegetações afetam minimamente na coleta de dados.

Em 2009, com a missão de fornecer dados de umidade do solo e salinidade do oceano, foi lançado o satélite Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), que possui sensores que operam na faixa do micro-ondas MIRAS (Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis) e são capazes de fornecer alta penetração no solo e alta resolução temporal (Kang *et al.*, 2016). A potencialidade do satélite SMOS em produzir dados confiáveis foi estudada no nordeste brasileiro, principalmente no estado de Pernambuco (Oliveira; Ribeiro Neto, 2021; Souza *et al.*, 2018). Nesse contexto, dados de umidade do solo em larga escala são de grande valia para o monitoramento desse parâmetro, no estado do Ceará.

No presente estudo, foi realizado uma avaliação dos dados de umidade do solo estimados pelo satélite SMOS, em comparação com dados de estações de monitoramento *in situ* do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) no Estado do Ceará. O impacto da precipitação da umidade do solo também foi analisado. Espera-se que esses dados possam auxiliar na otimização do uso da água na agricultura e sirva como uma alternativa viável para o monitoramento deste parâmetro.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a acurácia do satélite SMOS em estimar a umidade do solo para o estado do Ceará.

2.2 Objetivos específicos

- Estimar a umidade do solo via SMOS para as localidades: Catarina, Crato, Forquilha, Guaraciaba do Norte, General Sampaio, Jaguaribe, Mauriti, Pentecoste, Quixeramobim e Umari.
- Analisar a influência da precipitação na umidade do solo para essas localidades.
- Avaliar a acurácia da comparação entre os dados SMOS e *In situ*, através do BIAS, correlação r de Pearson e índice de erro RMSE.

3 REVISÃO DE LITERATURA

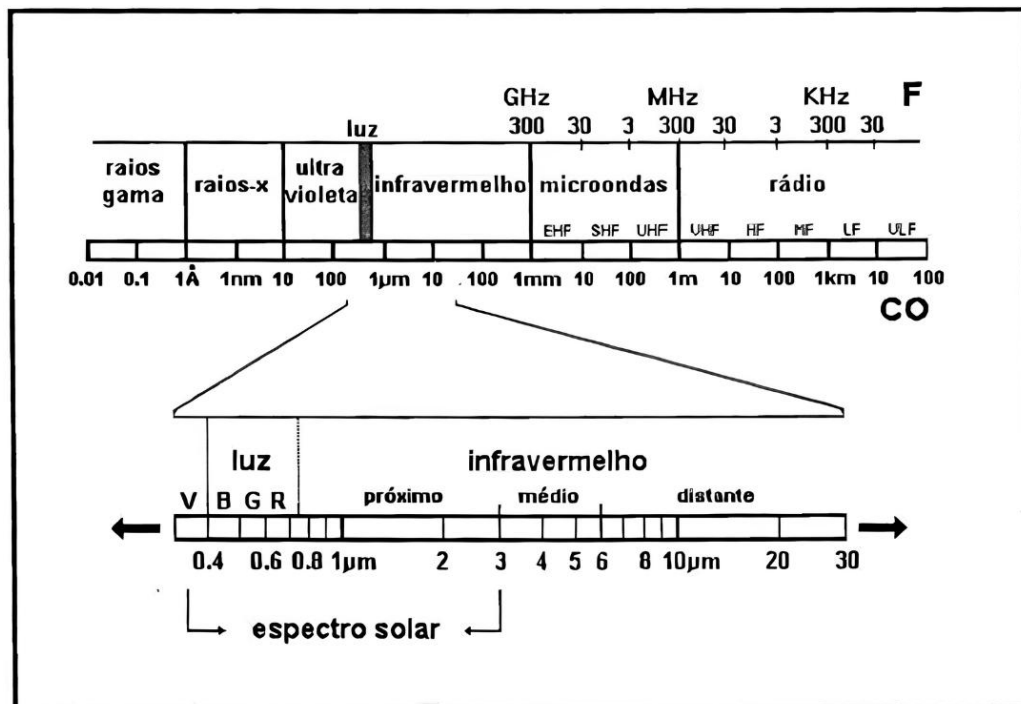
3.1 Princípios de Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é caracterizado como o conjunto de técnicas e processos para a obtenção de dados por meio das propriedades eletromagnéticas de um objeto ou superfície,

sem que haja contato físico entre ambos (Câmara *et al.*, 1996). Com base na definição podemos citar os dados de satélite, fotografias aéreas e radar como exemplos de dados de sensoriamento remoto, por captarem imagens por meio de radiação eletromagnética (Henderson, 1998; Meneses, 2012).

A radiação eletromagnética (Figura 1) se comporta de acordo com os princípios da teoria de onda, ou seja, uma dualidade de um campo elétrico e outro magnético. Duas importantes características são essenciais para a compressão dessa energia, são elas o comprimento de onda e frequência. Através dessas propriedades é possível quantificar e classificar a energia (Batista; Dias, 2005).

Figura 1 – O espectro eletromagnético.



Fonte: Moreira (1997)

A classificação da energia radiante é organizada no espectro eletromagnético, nele temos: radiação gama, raios-x, ultravioleta, luz visível, infravermelho, micro-ondas e rádio. Cada tipo de energia tem suas próprias características e utilidades, sendo as faixas do visível, infravermelho e micro-ondas as mais utilizadas para o sensoriamento remoto (Steffen; Moraes, 1993).

Sensores remotos captam a energia refletida ou emitida pelo alvo e transformam em dados numéricos, estes sensores são divididos em duas categorias, passivo e ativo (Gonçalves, 1999). Os sensores ativos produzem sua própria fonte de energia eletromagnética. Estas ondas

entram em contato com a superfície e interagem com o alvo, sendo refletida de volta para o satélite. Sensores ativos, normalmente operam na faixa do micro-ondas e utilizam a própria energia, e possuem como vantagem a capacidade de atravessar nuvens (Figueredo, 2005). Por outro lado, sensores passivos dependem da energia que está naturalmente disponível, sendo o sol a principal fonte de energia. Esse tipo de sensor deve ser posicionado de uma forma que a atmosfera não afete a energia eletromagnética refletida pelo corpo (Figueredo, 2005; Quartaroli, 2014).

Sobre os sensores, é possível determinar sua capacidade através de sua resolução, que se divide em: espacial, espectral, radiométrica e temporal. A resolução espacial indica a capacidade do sensor em identificar o menor objeto em uma imagem. A resolução espectral determina o número de bandas espectrais, assim como sua largura, comprimento e a posição no espectro eletromagnético. A resolução radiométrica detecta os níveis de intensidade dos níveis de radiância, ou seja, ela define a capacidade de um sensor diferenciar mudanças através do nível de cinza. A resolução temporal estabelece a frequência com que um sensor revisita a área, esse tempo está diretamente ligado à órbita do satélite (Meneses, 2012; Novo, 1992).

3.2 Umidade do solo

A umidade do solo é definida como a quantidade de água armazenada nos primeiros centímetros de solo, e que influencia na evaporação e na infiltração (Kerr *et al.*, 2010). A umidade do solo é um parâmetro essencial para compreendermos os ciclos biogeoquímicos, produtividade agrícola, eventos extremos de secas e inundações, bem como para a previsão de eventos climáticos, em escala regional e global (Mccol *et al.*, 2017; Vereecken *et al.*, 2014; Rossato *et al.*, 2017).

A evaporação da água armazenada no solo contribui para o ciclo da água e energia (Seneviratne, 2010). A umidade do solo influencia no balanço de energia através da radiação solar que incide na superfície (ondas curtas) e a radiação emitida pela superfície (radiação longa). A água da precipitação ao entrar em contato com o solo pode ser drenada ou escoada na superfície, esses processos impactam diretamente no balanço hídrico de um ambiente (Costa, 2017; Valente, 2023).

Eventos de seca e baixo rendimento agrícola são problemas que afetam grande parte do mundo (Wang, 2016). Dessa forma, Rossato (2017) investigou a correlação entre umidade do solo e produtividade agrícola. Através do uso de diversas culturas no seminário brasileiro, foi possível constatar que o rendimento médio das culturas está diretamente associado a práticas

que aumentem a umidade do solo, devido às plantas responderem melhor ao solo que possui uma melhor taxa de infiltração.

A umidade do solo tem grande impacto na previsão de precipitação por meio de modelagem numérica. Koster (2005) utilizou o experimento Global Land–Atmosphere Coupling Experiment (GLACE) para descobrir a influência da umidade do solo na geração de chuvas. Pode-se constatar que a umidade do solo em climas úmidos e áridos tem maior impacto no regime de chuvas.

A reflectometria no domínio do tempo (TDR) é um dos métodos mais utilizados para coleta de dados de umidade do solo, esse método consiste na forte correlação entre a constante dielétrica do solo úmido e o conteúdo volumétrico de água. Essa metodologia possui alta precisão, por descrever de forma detalhada a umidade na superfície do solo (Campbell, 1990; Greco; Guida, 2008; Santos, 2011). Apesar da alta precisão dos métodos *in-situ*, eles fornecem uma grande variabilidade espaço-temporal de dados, por terem estações de medição em locais pontuais, dificultando uma representação em larga escala (Rossato, 2010; Wang *et al.*, 2011).

3.3 Sensoriamento remoto aplicado à umidade do solo

Diante da importância da umidade do solo e da impossibilidade dos métodos *in situ* em fornecerem dados em larga escala, o sensoriamento remoto surge como uma alternativa viável, e que evoluiu bastante na última década (Mohanty *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2011).

Sensores remotos são capazes de determinar a umidade do solo por meio de diferentes posições do espectro eletromagnético, cada um com vantagens e desvantagens. Através da radiação do infravermelho a visualização se dá pela mudança das características na reflectância do solo, por outro lado, o infravermelho termal determina a umidade do solo a partir das propriedades térmicas do solo (Wang, 2009; Zhang; Zhou, 2016). No entanto, esses métodos de radiação infravermelha sofrem grande influência da atmosfera, impossibilitando determinar padrões de longas séries temporais (Zhang; Zhou, 2016).

Por outro lado, o sensoriamento remoto por micro-ondas ativo e passivo consegue analisar a superfície do solo através das nuvens, possibilitando monitoramento global de toda a superfície terrestre sem precisar de correções atmosféricas (Rossato, 2010). Essa faixa do espectro estima a umidade do solo com base no contraste da emissividade da constante dielétrica da água e do solo seco (Owe *et al.*, 1999). Sensores de micro-ondas ativos possuem alta resolução espacial, como é o caso do radar Radars de Abertura Sintética (SAR) que está acoplado em alguns satélites ERS (Europa) e Radarsat (Canadá) e possui 10 metros de resolução

espacial, mas baixa resolução temporal, geralmente com 1 mês de diferença de dados. No entanto, sensores passivos apesar de perderem em resolução espacial, geralmente entre 10 e 20 km, conseguem produzir dados diários, e com menos sensibilidade a vegetação e a rugosidade da superfície (Wigneron; Schmugge; Chanzy; Calvet; Kerr, 1998).

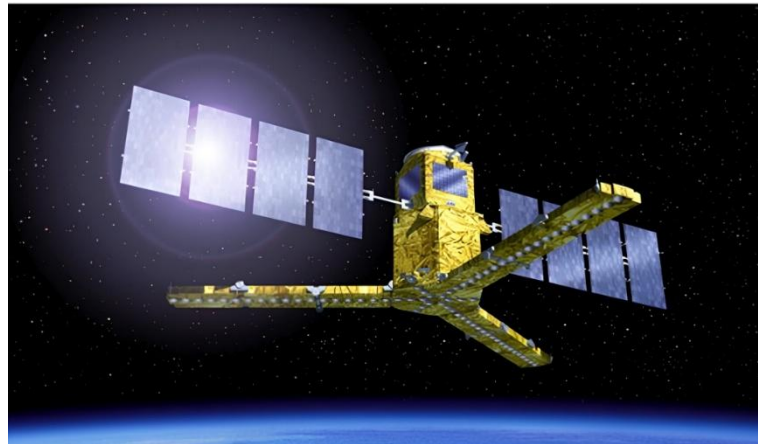
Um dos sensores mais importantes para o início do mapeamento de umidade do solo por micro-ondas passivo foi o Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), sensor que foi lançado a bordo do satélite AQUA em 2002. O AMSR-E opera na banda K e seu objetivo é medir parâmetros geofísicos para monitoramento de mudanças climáticas globais (Earthdata Nasa, 2024). Nesse sentido, Draper (2009) avaliou a umidade do solo da Austrália comparando os dados do sensor AMSR-E com os das estações *in situ*, apesar da forte correspondência entre os dados a banda utilizada pelo sensor é afetada pela vegetação. Dessa forma, como uma maneira de aprimorar a obtenção de dados de umidade do solo por micro-ondas passivo, foi desenvolvido sensores que operam na banda L, por sofrerem menos interferências da vegetação (Huertero, 2019; Rossato, 2010).

3.4 Missão SMOS

Em 2009 foi lançado o satélite Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) (Figura 2) da European Space Agency (ESA), com a missão de fornecer dados globais de umidade do solo e salinidade da superfície do mar (Figura 3). A bordo está o sensor de micro-ondas passivas Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis (MIRAS), que funciona na banda L, com uma frequência de 1,4 GHz e na polarização HV. Esse conjunto fornece dados com menor influência da vegetação e rugosidade da superfície do solo (Kerr *et al.*, 2012; Rossato; Angelis, 2013).

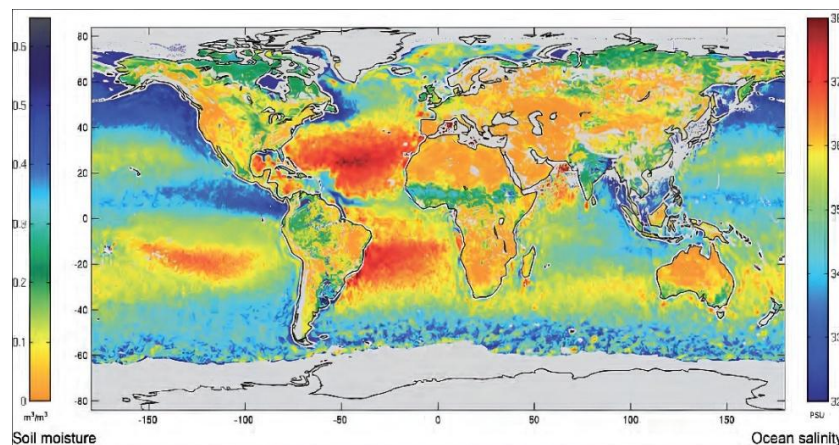
O instrumento MIRAS possui 69 radiômetros distribuídos entre seus três braços e o hub central, eles servem para medir a temperatura de brilho captada pelos receptores. Um dos grandes diferenciais do SMOS é sua capacidade de produzir imagens em diferentes ângulos. Através de sua medição multiangular é possível determinar a opacidade da vegetação, esse parâmetro adicional permite uma melhor análise da umidade do solo. Essa característica é um avanço em comparação ao radiômetro de varredura cônica do AMSR que gera imagens sempre do mesmo ângulo (Kerr *et al.*, 2010; McMullan *et al.*, 2008).

Figura 2 – Satélite SMOS.



Fonte: EOPORTAL (2024)

Figura 3 – Mapa global de dados de umidade do solo e salinidade da superfície do mar pelo SMOS, para agosto de 2015.



Fonte: EOPORTAL (2024)

O satélite SMOS está em uma órbita sol-síncrona, com uma altitude de 760 km e sua revisita a um local específico é de 3 dias. O SMOS adquire imagens através de suas duas órbitas, a ascendente que passa pelo Equador às 6h00 e a descendente às 18h00, isso aumenta a precisão do sensor diminuindo erros de observação. Sua resolução espacial é de aproximadamente 43 km, mas é possível melhorar a resolução a depender do nível de processamento do produto, no L2 a resolução torna-se 40km, 25km no L3 e 1 km no L4. A partir de 2010 os dados do SMOS começaram a ser disponibilizados para a comunidade científica, desde então várias aplicações em diversas áreas foram feitas (Cui *et al.*, 2018, Kerr *et al.*, 2010; McMullan *et al.*, 2008).

Champagne *et al.* (2014) realizaram um estudo para avaliar o risco agrícola no Canadá, para isso foram produzidos mapas de umidade do solo que indicavam as secas e inundações. Os dados do SMOS foram compilados de 2010 a 2013 nas datas de 01 de abril a 31 de outubro,

esse período corresponde à estação de cultivo agrícola, posteriormente os dados foram aplicados para calcular anomalias de umidade do solo. Os resultados do SMOS apesar da limitação de identificar eventos extremos nesse estudo, se mostrou eficaz ao fornecer dados quase em tempo real de grandes áreas.

Já para o NEB, Souza (2018) validou os dados do SMOS para o estado de Pernambuco em diferentes regiões climáticas, e comparou os dados com estações *in situ* de umidade do solo. A partir disso, foram feitas análises estatísticas a fim de identificar anomalias de seca nas regiões. Os resultados mostraram que o satélite SMOS devido a sua capacidade de coletar dados na camada mais superficial do solo, demonstrou maior precisão nas regiões mais áridas. Mesmo com uma leve superestimação dos dados em comparação às redes de monitoramento *in situ*, o satélite foi capaz de fornecer informações importantes para todo o território pernambucano.

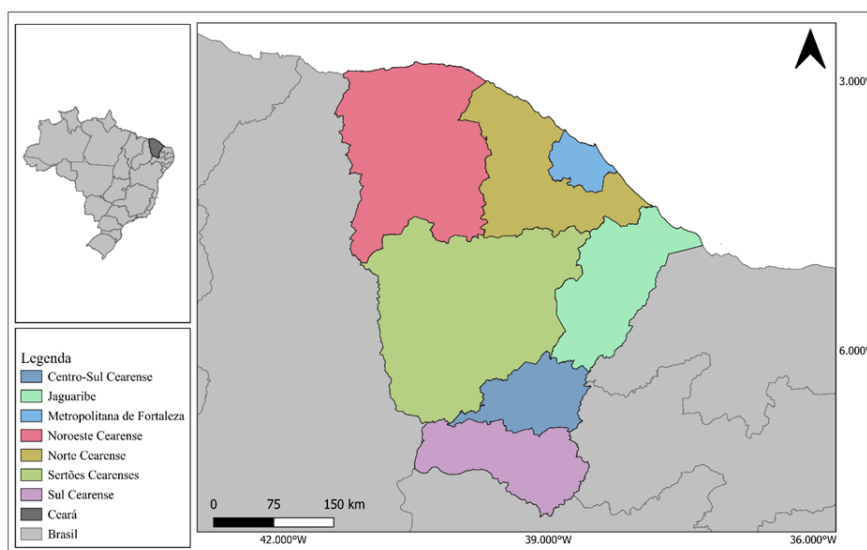
Os dados do satélite SMOS, portanto, tem se mostrado essenciais para estudos hidrológicos e climatológicos, principalmente em regiões semiáridas como o nordeste do Brasil.

4 ÁREA DE ESTUDOS, DADOS E METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

A área de estudo da pesquisa engloba todo o Estado do Ceará (Figura 4). A localização geográfica do estado encontra-se entre latitudes 02°47' S e 07°51' S e as longitudes 37°14' O e 41°24' com uma área de 148.894 km², 184 municípios e 93% de seu território está situado em um clima predominantemente Tropical Quente Semiárido (IBGE, 2011).

Figura 4 – Mapa das mesorregiões do Ceará



Fonte: Autoria própria (2025)

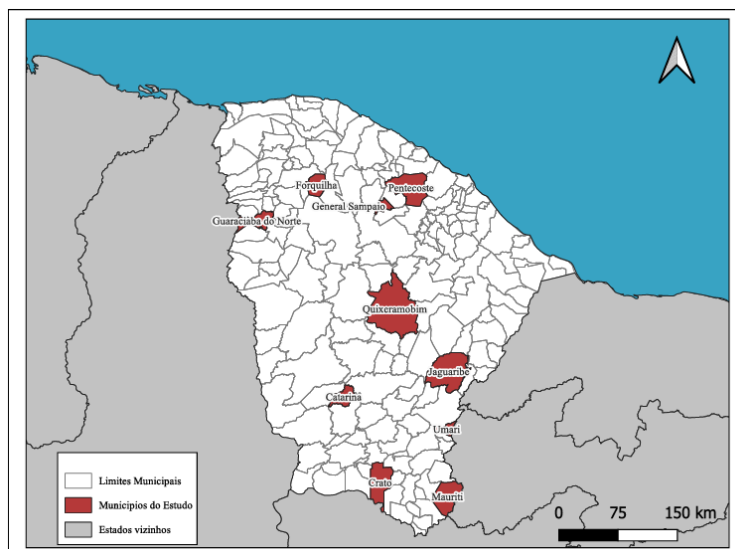
O Estado é definido pelas altas temperaturas, elevada insolação e pela irregularidade das chuvas, que se concentram entre janeiro e junho. O clima nas regiões mais áridas apresenta médias pluviométricas anuais menores do que 500 mm/ano, enquanto nas áreas com clima semiárido brando, as médias anuais chegam a 1000 mm/ano (Feitosa; Oliveira, 2020).

O território é dividido em 7 mesorregiões: Metropolitana de Fortaleza, Norte Cearense, Noroeste Cearense, Sertões Cearenses, Jaguaribe, Centro Sul Cearense e Sul Cearense. Essas regiões foram divididas de acordo com os aspectos físicos, geográficos e de estrutura produtiva (CEARÁ.GOV; 2010).

As mesorregiões nortes e sul cearense são regiões com maior ocorrência de chuva com vegetação densa por possuírem um clima mais ameno comparado ao restante do Estado, sua pluviosidade anual que ultrapassa 1000 mm. Por outro lado, os municípios das mesorregiões do Jaguaribe e Sertões Cearenses apresentam clima semiárido com vegetação caatinga arbustiva aberta, floresta, caducifólia espinhosa, e sua precipitação média anual é inferior a 1000 mm (Rodrigues, 2023).

Foram escolhidos, para este trabalho, os municípios de Catarina, Crato, Forquilha, Guaraciaba do Norte, General Sampaio, Jaguaribe, Mauriti, Pentecoste, Quixeramobim e Umari, conforme a figura 5 e tabela 1. Essas localidades foram selecionadas por possuírem alta série temporal de dados *in situ* de precipitação e umidade do solo, além de serem representativas dessas macrorregiões do estado do Ceará.

Figura 5 – Localização das estações de umidade do solo *In situ*



Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 1 – Localização e mesorregião das 10 estações de interesse

Estação (CEMADEM)	Mesorregião	Latitude	Longitude
Catarina	Sertões cearenses	-5,50	-38,26
Crato	Sul cearense	-6,94	-38,97
Forquilha	Noroeste cearense	-4,21	-39,18
General Sampaio	Norte cearense	-6,14	-39,86
Guaraciaba do Norte	Noroeste cearense	-4,15	-40,72
Jaguaribe	Jaguaribe	-4,71	-37,34
Mauriti	Sul cearense	-6,24	-39,19
Pentecoste	Norte cearense	-3,77	-40,03
Quixeramobim	Sertões cearenses	-4,80	-40,32
Umari	Centro sul cearense	-3,68	-39,34

Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Dados *In situ* de umidade do solo e precipitação

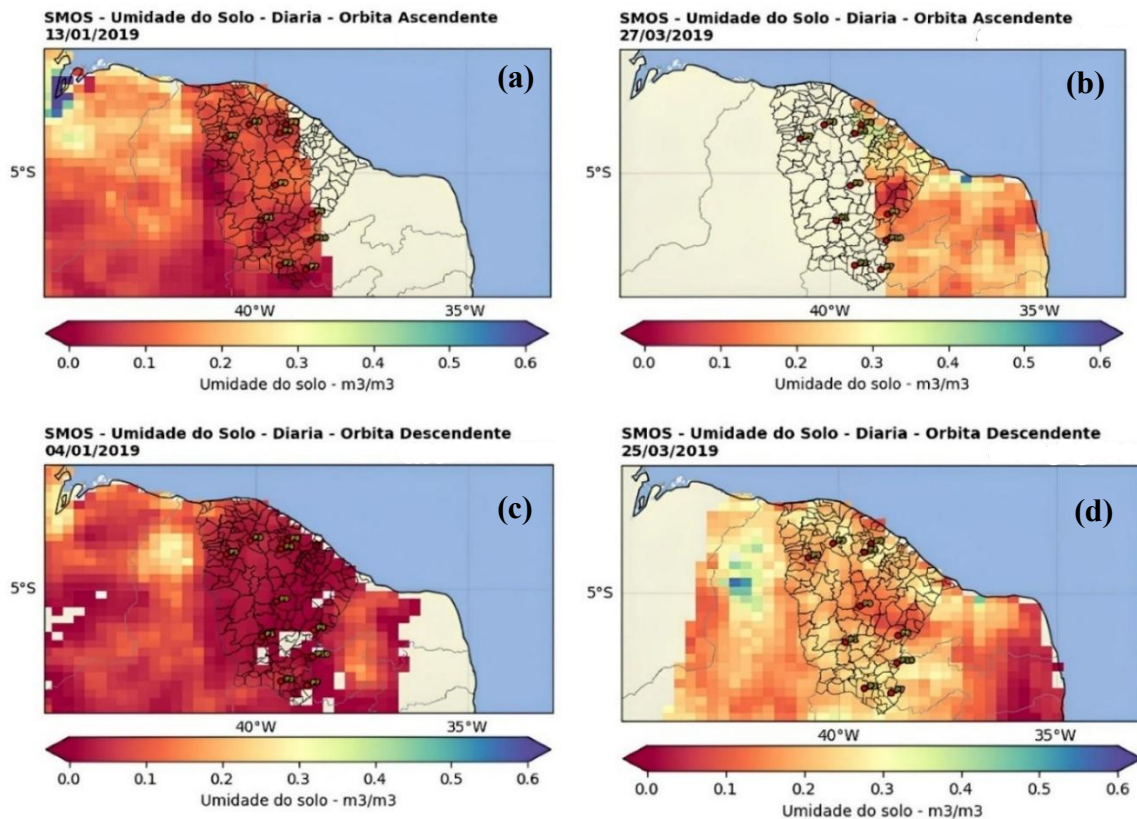
Os dados *In situ* de umidade do solo e precipitação foram utilizados para a validação do satélite SMOS. A rede de monitoramento do CEMADEM possui 64 estações no Estado do Ceará, e disponibilizou dados de umidade do solo coletados pelo sensor EC-5, da Decagon Devices, com geração de dados a cada hora nas profundidades de 10 cm e 20 cm, dessa forma foi necessário tirar a média dos valores obtidos para cada dia. Para este trabalho foi considerado os dados de 10 cm, pois o SMOS só consegue captar a umidade do solo nos primeiros 2 centímetros da superfície do solo.

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) possui 649 estações pluviométricas ativas, para esse estudo foram selecionados os postos com maior proximidade das estações *in situ* de umidade do solo. Ao todo foram escolhidas 10 estações de dados *in situ* localizadas nos municípios de estudo, com uma série temporal de 2015 a 2019. Ambos os dados foram organizados no Excel.

4.3 Dados SMOS

Os produtos de umidade do solo ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$) do satélite SMOS foram disponibilizados e processados gratuitamente pela Barcelona Expert Center (SMOS-BEC). Foi utilizado os dados com nível de processamento L3, v003, com resolução temporal diária e 25 km de resolução espacial. Após a coleta de dados, foram criados mapas diários (Figura 6) em linguagem de programação Python das duas órbitas, ascendente que passa na linha do Equador as 6h00 e descendente que cruza a linha do Equador as 18h. Dessa forma, foi possível identificar os dias em que o sensor registrou dados nas estações de interesse.

Figura 6 – Imagens representativas das órbitas ascendentes e descendentes do satélite SMOS sobre o estado do Ceará.



Fonte: Autoria própria (2025)

Foi possível notar que o SMOS respondia bem ao período seco e chuvoso do Ceará, pois as imagens do mês de janeiro (Figuras 4a e 4c), apresentou coloração predominantemente vermelha, indicando baixa umidade do solo, enquanto as imagens do mês de março (figuras 4b e 4d), adquiriu uma colocação mais clara, por conta das chuvas da região. Também, notou-se que nem sempre o sensor cobria todo o território, gerando pixel sem informação. Como o satélite SMOS possui duas órbitas, foi feita a média dos dois valores na análise, mas no caso de apenas uma das órbitas ter registro de dados, foi considerado o valor único obtido.

4.4 Extração da umidade do solo via SMOS

Para validar os dados do satélite, foi criado um código em linguagem de programação Python capaz de extrair os valores do pixel do satélite mais próximo do local onde as estações do CEMADEM escolhidas estavam localizadas. Os valores diários do SMOS, umidade do solo *In situ* e precipitação do período de 2015 a 2019 foram processados de forma a excluir células em branco. Posteriormente, todas as informações

foram agrupadas em um único arquivo Excel para que fosse feito a comparação de valores.

4.5 Análise estatística

Para determinar a qualidade dos dados utilizados, foi aplicado o coeficiente de correlação de Pearson (r), BIAS e o RMSE, entre os dados do satélite e o *In situ* de umidade do solo. O coeficiente de Pearson correlaciona variáveis, podendo variar de -1 a 1. O valor indica a força da relação entre as variáveis e o sinal mostra se a direção é positiva ou negativa. Uma correlação positiva acontece quando y cresce na medida em que x cresce, já a correlação negativa ocorre quando y decresce à medida em que x cresce, conforme tabela 2, (Figueiredo; Silva, 2010).

Tabela 2 – Classificação das correlações

Correlação	Coeficiente r de Pearson
Muito fraca	0,00 – 0,19
Fraca	0,20 – 0,39
Moderada	0,40 – 0,69
Forte	0,70 – 0,89
Muito Forte	0,90 – 1,00

Fonte: Shimakura (2006)

O BIAS e o RMSE, utilizam como base subtrações entre os dados de umidade do solo e os dados estimados pelo SMOS. O BIAS (Equação 1) é usado para avaliar se os dados do satélite apresentam tendências, como superestimação ou subestimação dos dados. Já o RMSE (Equação 2) é usado para medir a acurácia entre o valor real e o previsto, em todos esses casos, quanto mais próximo de 0, melhor será os valores obtidos pelo SMOS.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (SM_{SMOS,i} - SM_{INSITU,i})}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Dessa forma, na fórmula do BIAS (Equação 1), o SM (soil moisture) é a umidade do solo estimada pelo SMOS, subtraída pelo valor das estações *in situ*, por último, o valor obtido é dividido por n (número total de células). Já para o RMSE (Equação 2), o \hat{Y}_i = SMOS, Y_i = *In situ*, n = número total de células.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados estatísticos da tabela 3 mostraram-se consistentes entre os municípios, ou seja, com valores próximos, com exceção de Umari. Destaca-se o valor entre 0,06 e 0,08 para o desvio padrão, que representa uma importante variável em determinar que os valores gerais estão próximos da média.

Tabela 3 – Dados estatísticos da umidade do solo SMOS e estações de monitoramento in situ.

Estação	Latitude	Longitude	Quant. de dados	Média (m ³ ·m ⁻³)	Máx. (m ³ ·m ⁻³)	Desv. padrão
Catarina	-5,50	-38,26	686	0,09	0,32	0,06
Crato	-6,94	-38,97	712	0,10	0,35	0,06
Forquilha	-4,21	-39,18	959	0,10	0,40	0,08
General Sampaio	-6,14	-39,86	821	0,08	0,41	0,07
Guaraciaba do Norte	-4,15	-40,72	617	0,10	0,28	0,07
Jaguaribe	-4,71	-37,34	378	0,07	0,33	0,06
Mauriti	-6,24	-39,19	977	0,05	0,42	0,06
Pentecoste	-3,77	-40,03	876	0,10	0,32	0,08
Quixeramobim	-4,80	-40,32	404	0,06	0,45	0,06
Umari	-3,68	-39,34	1029	0,13	0,58	0,14

Fonte: Autoria própria (2025)

5.1 Análise das orbitas SMOS

Todos os municípios do estudo, apresentaram melhores correlações *r* de Pearson (Tabela 4) na orbita ascendente, mas somente Guaraciaba do Norte que obteve uma correlação com classificação diferente entre orbitas, sendo a ascendente classificada como “forte” e a descendente como “moderada”. Para o BIAS e o RMSE, as estações mostraram-se com resultados semelhante entre as orbitas. Esse comportamento das orbitas também foi relatado por Rossato (2020).

Tabela 4 – Dados estatísticos das orbitas SMOS - Brasil, 2025

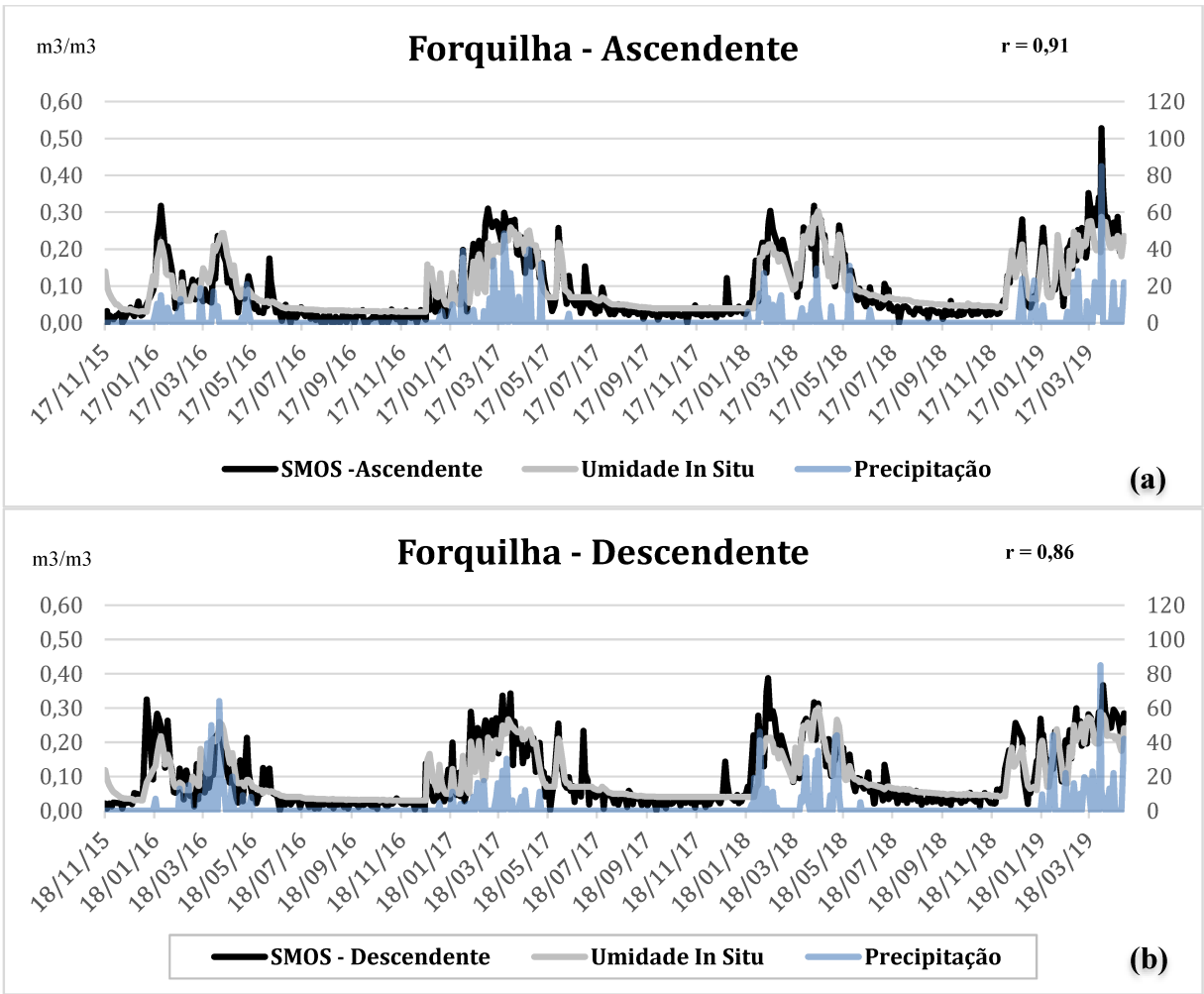
Estação	Ascendente			Descendente		
	Corr. Coef.	BIAS	RMSE	Corr. Coef.	BIAS	RMSE
Catarina	0,14	-0,05	0,07	0,15	-0,06	0,07
Crato	0,80	-0,04	0,06	0,77	0,04	0,05
Forquilha	0,91	-0,004	0,04	0,86	0,00	0,04
General Sampaio	0,84	0,01	0,04	0,82	0,02	0,05
Guaraciaba do Norte	0,76	-0,09	0,07	0,68	-0,08	0,07
Jaguaribe	0,73	0,004	0,05	0,70	0,01	0,05
Mauriti	0,83	0,03	0,04	0,73	0,03	0,05

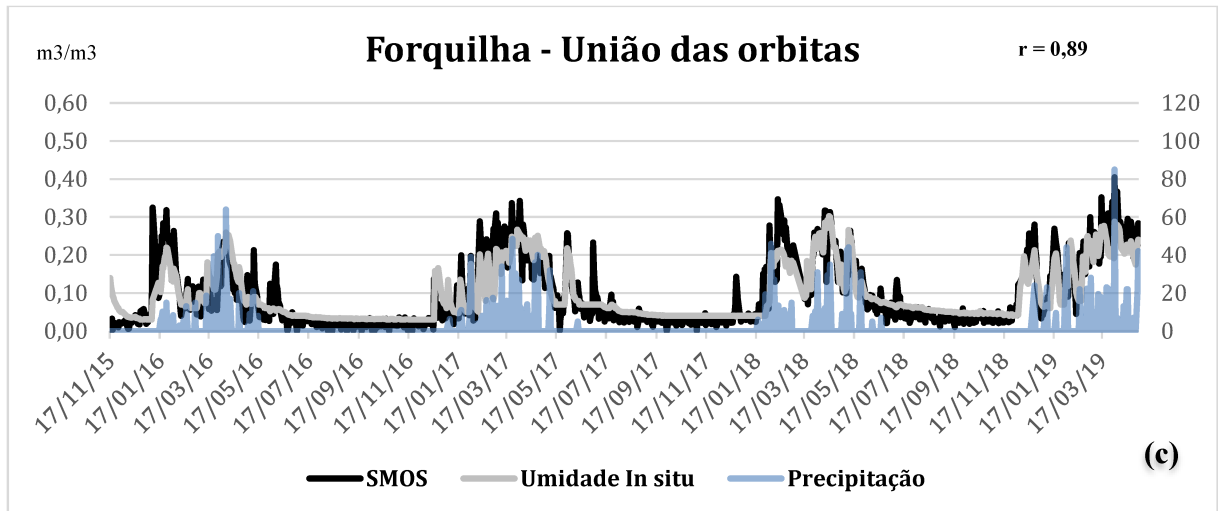
Pentecoste	0,75	-0,08	0,06	0,73	-0,07	0,06
Quixeramobim	0,67	-0,03	0,05	0,62	-0,03	0,06
Umari	-0,01	-0,11	0,09	-0,03	-0,12	0,09

Fonte: Autoria própria (2025)

Foram elaborados gráficos das orbitas ascendente e descendente da estação de Forquilha, a fim de analisar o comportamento das variáveis do satélite, umidade do solo *in situ* e precipitação (figura 7a e 7b), dessa forma, foi possível notar a semelhança entre o comportamento das orbitas do SMOS, diante disso, optou-se por seguir o proposto por Souza (2018) ao unir as orbitas com o intuito de obter uma maior quantidade de dados por estação (figura 7c).

Figura 7 – Série temporal diária das orbitas ascendente (a), descendente (b) e união das órbitas (c) do SMOS, umidade do solo *In situ* e precipitação.



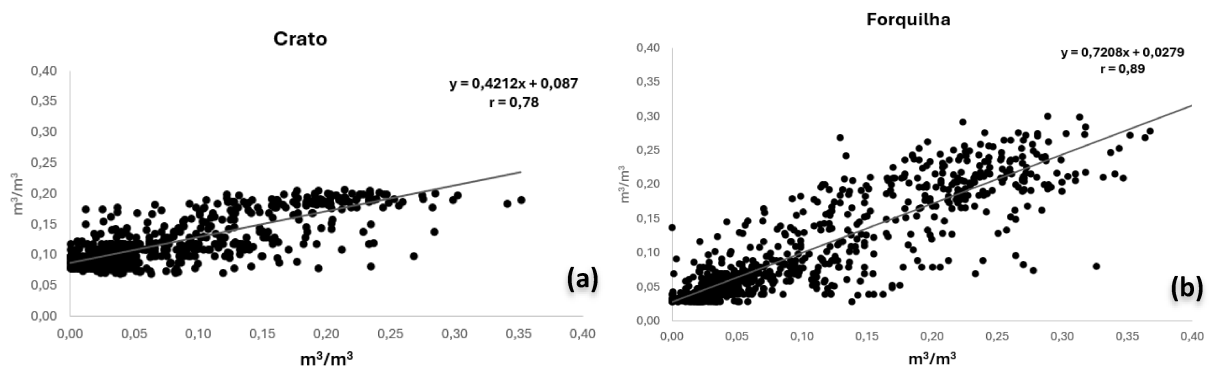


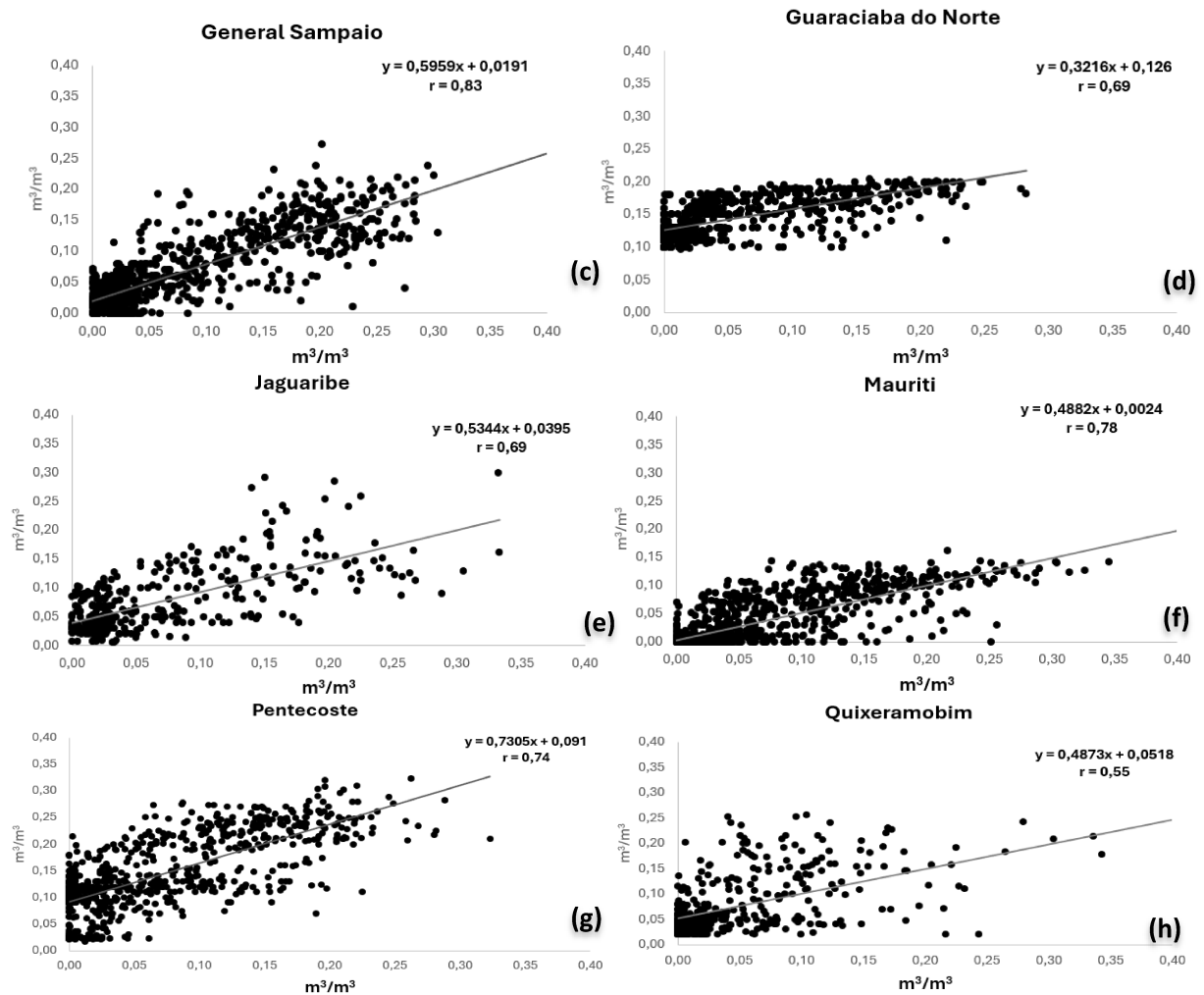
Fonte: Autoria própria (2025)

5.2 Análise da Série Temporal Diária

Dos 10 municípios de interesse localizados no estado do Ceará, 8 apresentaram resultados satisfatórios entre os dados in situ e remoto, através do cálculo do coeficiente de correlação de Pearson. Dessas estações, Forquilha e General Sampaio (Figura 8 b e c), apresentaram os melhores resultados com $r = 0,89$ e $r = 0,83$, respectivamente. As estações de Crato, Mauriti e Pentecoste (Figura 8 a, f e g) também apresentaram valores de forte correlação com os valores de r entre 0,72 e 0,77. Os municípios de Guaraciaba do norte, Jaguaribe e Quixeramobim (Figura 8 d, e h), foram classificados com uma correlação moderada, com o r entre 0,55 e 0,69.

Figura 8 – Gráficos de dispersão da umidade do solo estimada pelo satélite SMOS e obtida in situ pelas estações do CEMADEM





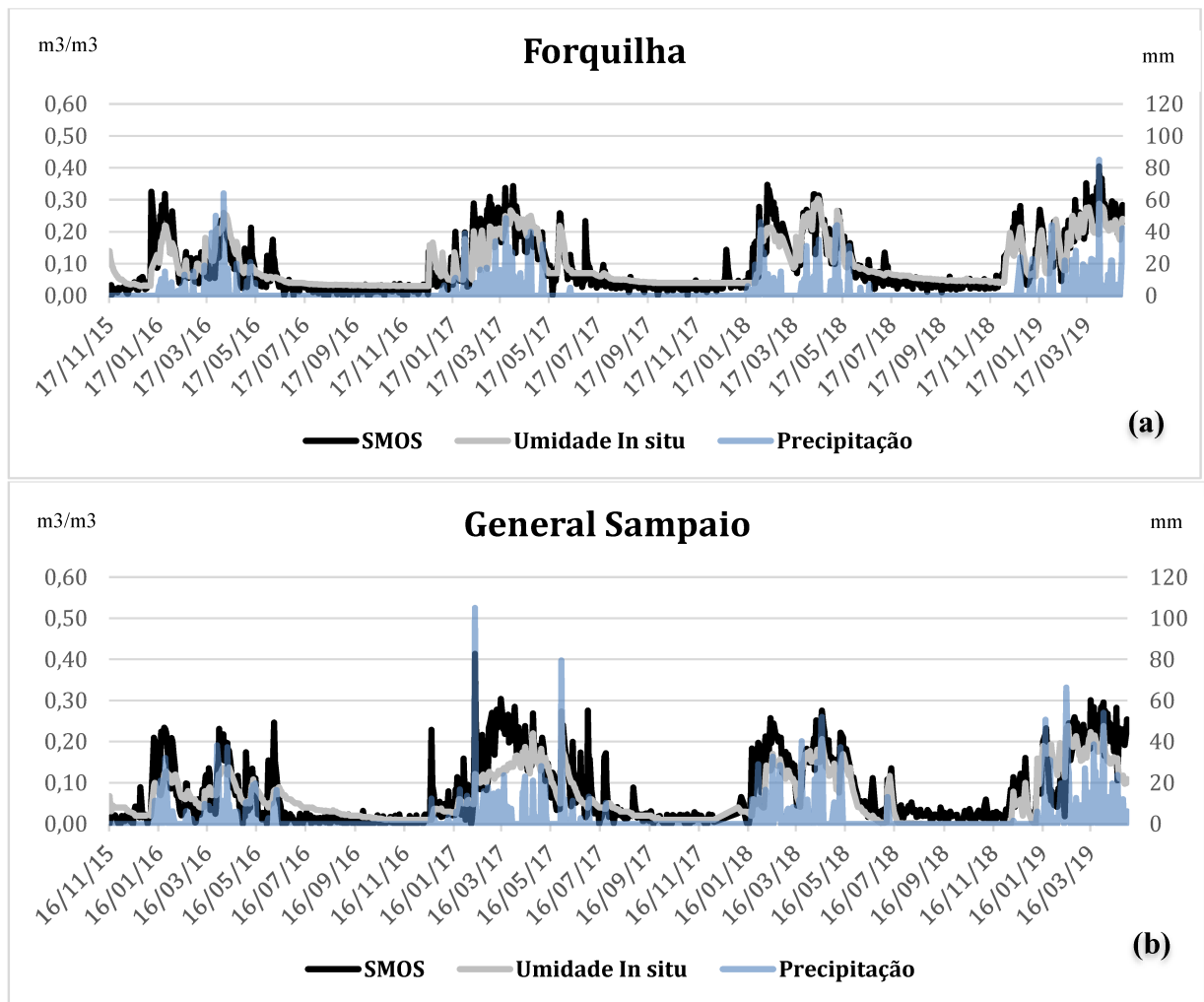
Fonte: Autoria própria (2025)

As estações de Forquilha e General Sampaio pertencentes às mesorregiões noroeste e norte respectivamente, destacaram-se pelo comportamento semelhante das 3 variáveis no período de 2015 a 2019. Ambas possuem média pluviométrica semelhante, de 800 mm ao ano, e estão a 150 km de distância uma da outra. Para o município de Forquilha (Figura 9a), o SMOS, apresentou superestimação dos dados nos períodos chuvosos, como exemplo do dia 02/04/2017 em que o satélite estimou o valor de umidade do solo $0,34 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, enquanto a estação in situ o valor de 0,25. Este comportamento se repete para os períodos de chuva de 2015 a 2019. Por outro lado, nos períodos de seca, nota-se uma subestimação dos dados, dia 26/07/2017, SMOS = $0,03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$, estação in situ = $0,07 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Já a estação do CEMADEM localizada em General Sampaio (Figura 9b), o satélite superestimou os dados, tanto para o período seco, quanto para o chuvoso, a exemplo dos dias 07/06/2016, SMOS: $0,25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ e estação in situ = 0,08. O município de General Sampaio registrou uma precipitação de 105 mm no dia 11/07/2017, através das estações da FUNCEME, neste dia o SMOS registrou o valor de 0,41 de umidade do solo, este evento se repetiu para o

dia 29/05/2019, FUNCEME: 79,4 mm, SMOS: 0,20 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$. Estudos de validação do satélite SMOS, no estado de Pernambuco, obtiveram melhores resultados estatísticos nas regiões semiáridas, além de apresentarem subestimação do sensor MIRAS para os dias de precipitação intensa (Jucá et al., 2019; Souza et al., 2018).

Figura 9 – Série temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo *In situ*, e precipitação dos municípios com correlação entre 0,8 e 0,9.



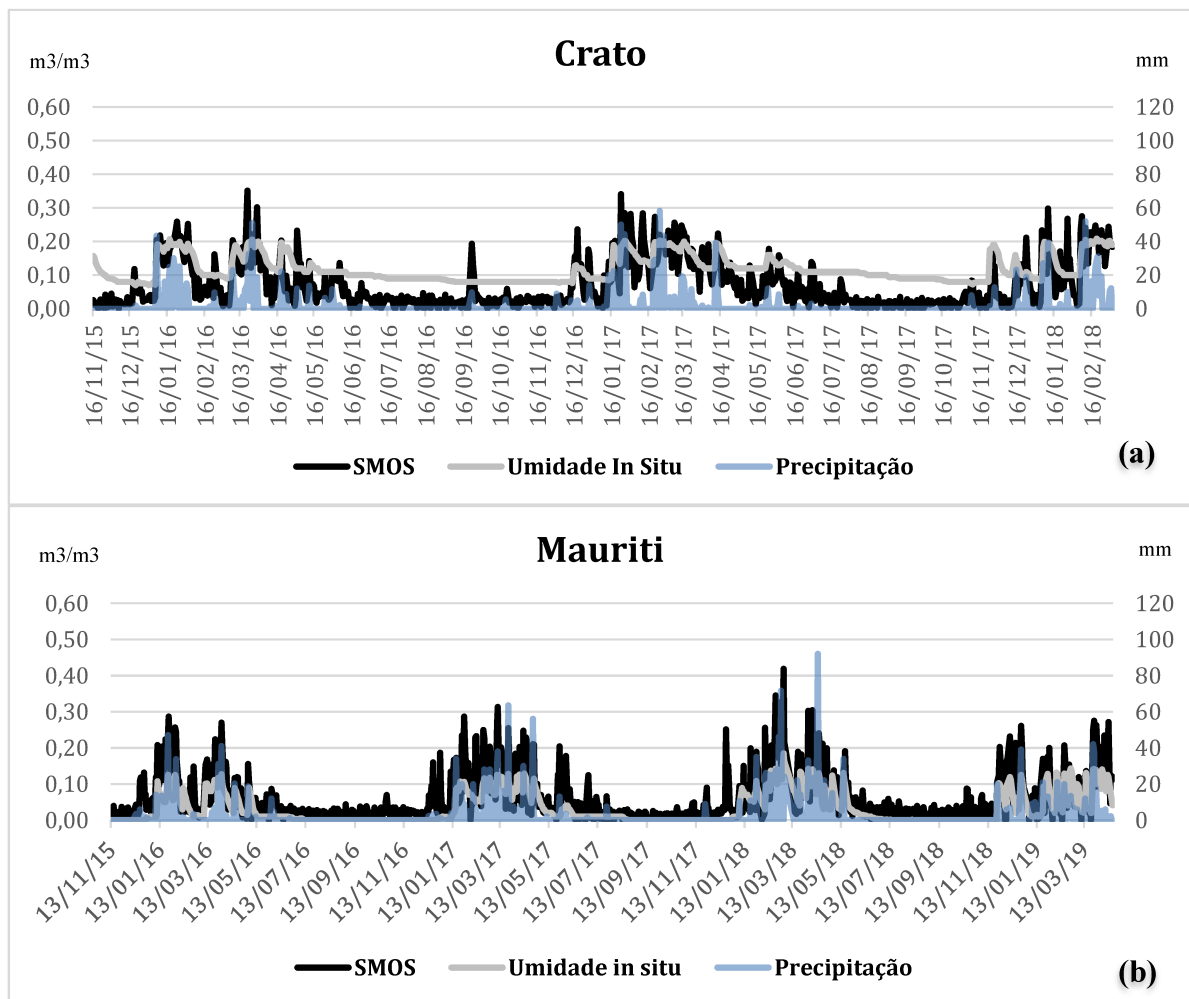
Fonte: Autoria própria (2025)

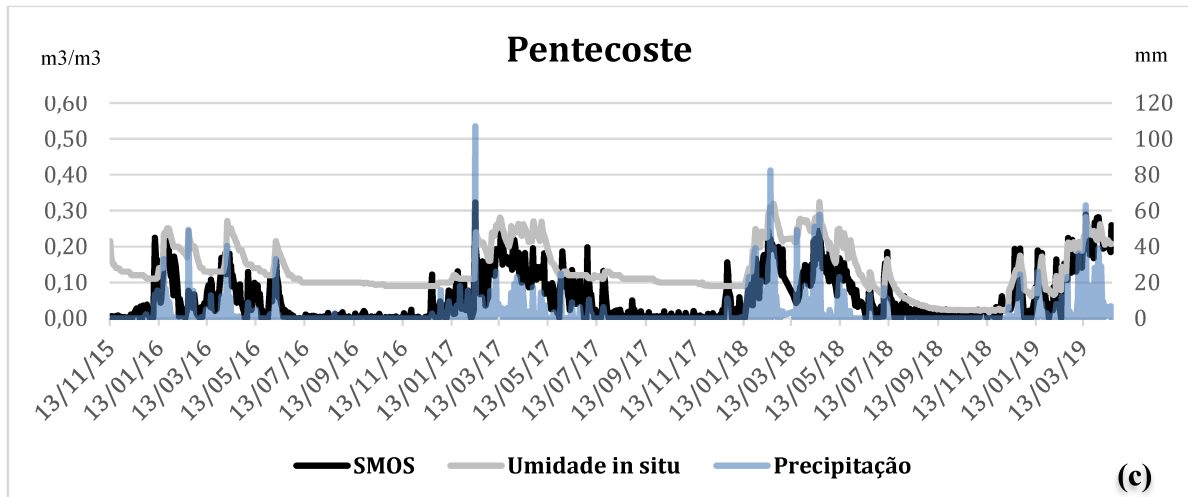
Já para as estações de Crato e Mauriti, ambas pertencem a mesorregião Sul cearense, ou seja, ambas compartilham condições climáticas semelhantes, com precipitação média anual abaixo de 700 mm. Na figura 10a, o SMOS subestimou os valores em comparação com os dados de chuva e medidos pelo CEMADEM. Como exemplo do dia 26/08/2016, em que a FUNCEME não registrou chuvas, e a estação de Crato estimou o valor de 0,09 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ de umidade do solo, esse comportamento se repetiu para todos os anos da análise.

Na figura 10b, a estação de Mauriti seguiu de maneira semelhante a Crato, com subestimação dos dados por parte do SMOS, mas apesar disso, seguiu a curva da precipitação. A estação de Pentecoste está localizada no Norte cearense, com precipitação média de 800 mm. No gráfico de correlação da figura 10c, pode-se notar a tendência do sensor MIRAS em subestimar os valores de umidade do solo, nos dias com alta precipitação, já que no dia 11/02/17 as estações de precipitação registraram um valor de 107 mm, mas o SMOS estimou o valor de $0,32 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Apesar da forte correlação entre os dados, as estações de Crato e Pentecoste, apresentaram superestimação dos valores de umidade do solo medidas pelos equipamentos *in situ*. Nota-se que mesmo no período seco entre maio e dezembro, as estações nunca indicam um solo totalmente seco.

Figura 10 – Serie temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo *In situ*, e precipitação dos municípios com correlação entre 0,7 e 0,8.



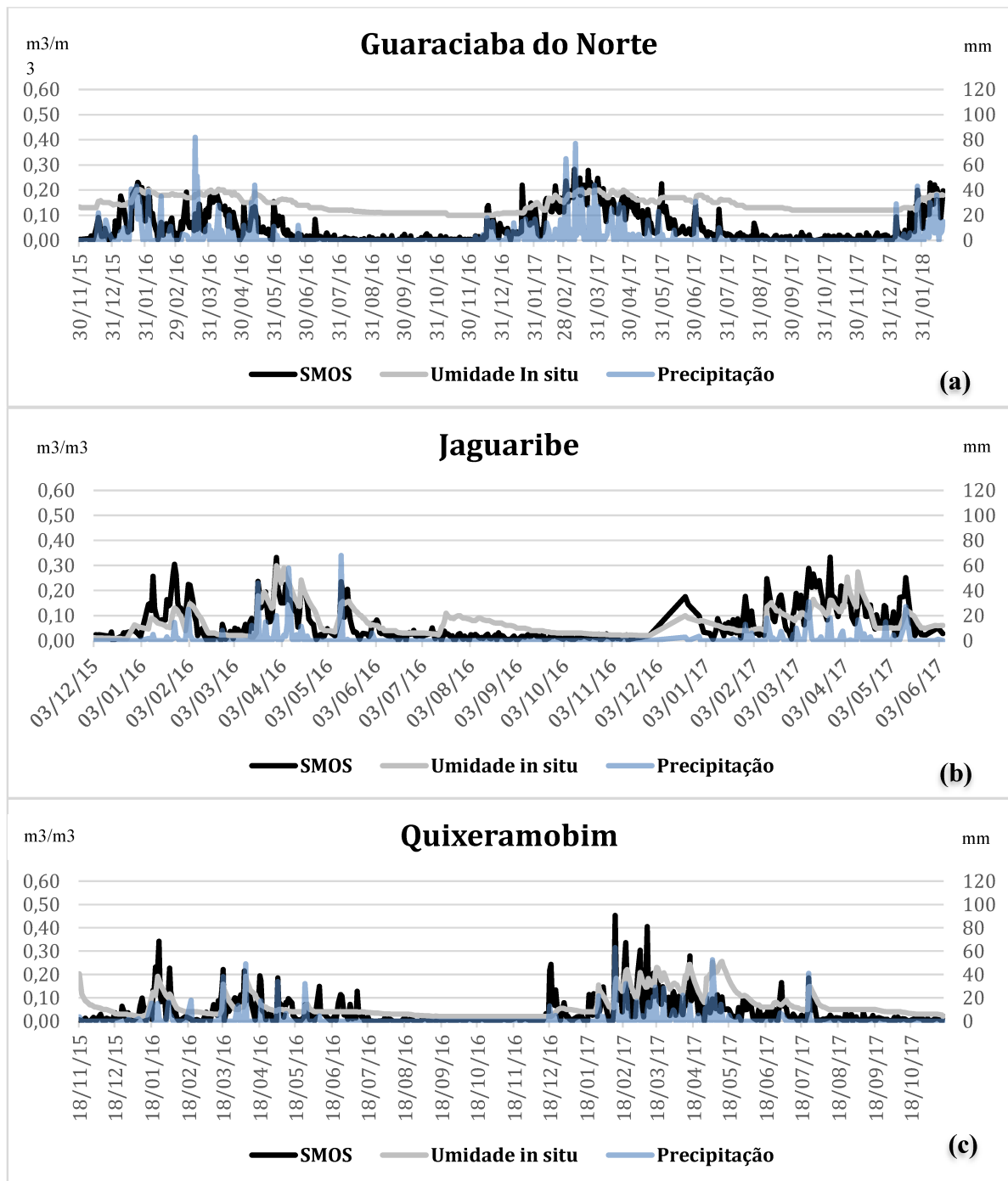


Fonte: Autoria própria (2025)

Os municípios de Guaraciaba do norte, Jaguaribe e Quixeramobim, apresentaram divergências entre as variáveis de umidade do solo in situ, SMOS e precipitação. A estação de Guaraciaba do norte (figura 11a), demonstrou melhor correlação entre os dados no período chuvoso, onde é possível notar boa relação entre os dados, mas nos períodos de estiagem a estação in situ parece superestimar os dados de umidade do solo, pois mesmo sem indícios de chuva nos pluviômetros da FUNCEME, a estação de umidade do solo apresentou valores entre 0,10 e 0,20 $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Na figura 11b, o município de Jaguaribe, apresentou poucos picos de chuva, mas com baixa correlação entre os dados in situ e o SMOS, com os dados de umidade do solo sendo superiores aos das estações do CEMADEM, nos períodos chuvosos, e inferiores nos períodos de estiagem. A estação de Quixeramobim (Figura 11c), apresentou um dos menores valores de correlação, através do gráfico de série temporal, é possível notar subestimação e superestimação dos dados do SMOS no período chuvoso, ocorrendo em moderada relação entre os dados do satélite e in situ.

Figura 11 – Série temporal diária da união de orbitas SMOS, umidade do solo *In situ* e precipitação dos municípios com correlação entre $r = 0,5$ e $0,69$



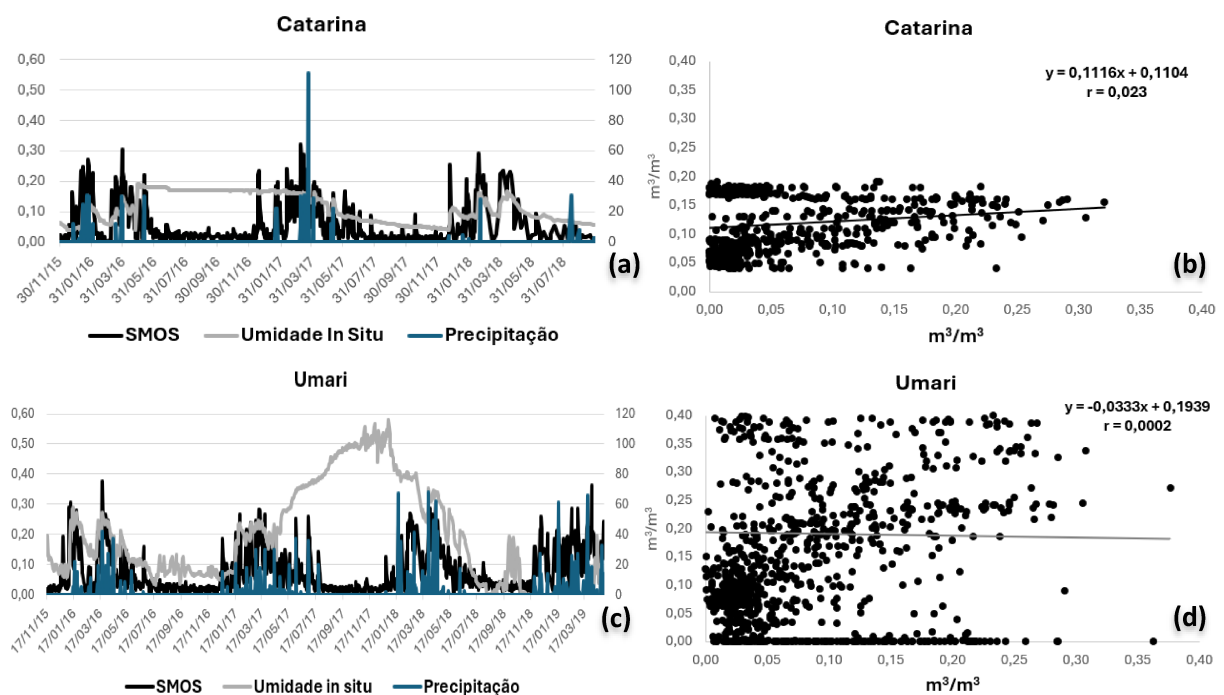
Fonte: Autoria própria (2025)

As estações de Catarina e Umari apresentaram um comportamento diferente. O município de Catarina está localizado nos sertões cearenses, uma região característica por ter um regime de chuva abaixo de 600 mm ano, dito isso, através da (Figura 12a), é possível notar que no ano de 2016 a estação *in situ* registrou valores de $0,20 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ de umidade do solo ao longo do ano. De acordo com o IPECE (2016), o município de Catarina registrou uma chuva

abaixo de 400 mm anual, em 2016. Além disso, na figura 12b, com uma correlação classificada como fraca, é possível notar a dispersão entre os dados *In situ* com os demais.

Um cenário semelhante é visto para o município de Umari (figura 12c) que entre o mês de maio a janeiro de 2017, a estação do CEMADEM registrou um valor médio de $0,40 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ de umidade do solo, em um período de estiagem da região, além disso, através da curva de precipitação nota-se a falta de chuva no período de maiores valores nas estações *in situ*. Dessa forma, a figura 12d, que corresponde ao gráfico de dispersão da região, apresentou dados altamente dispersos entre as variáveis. Sensores capacitivos de monitoramento de umidade do solo necessitam de calibração, pois mudanças nas características do solo afetam a leitura do sensor, gerando dados irreais do local de análise (Gasch *et al.*, 2017; Sena *et al.*, 2020). Segundo estes autores, sondas não calibradas adequadamente, podem subestimar ou superestimar os dados de umidade do solo.

Figura 12 – Série temporal e gráfico de dispersão dos municípios com baixa correlação



Fonte: Autoria própria (2025)

5.3 Análise estatística

Com base nos resultados do BIAS, o satélite SMOS demonstrou uma leve tendência em subestimar os valores reais, 8 estações apresentaram valores negativos entre o BIAS com -0,7 a -0,001 (Tabela 5). Somente os municípios de General Sampaio e Mauriti tiveram valores positivos, indicando superestimação dos dados do SMOS. Souza (2019) em sua tese, utilizou

dados de 2010 a 2017 para 116 estações in situ localizadas em diferentes regiões climáticas de Pernambuco e encontrou 75% das estações do estudo com resultados positivos para o BIAS, mesmo nas regiões mais áridas de Pernambuco. Já para os resultados do RMSE (Tabela 4), foi possível visualizar pouca variação entre os resultados entre 0,04 e 0,08. Nota-se uma boa acurácia valores do SMOS em relação às estações do CEMADEM.

Tabela 5 – Dados estatísticos BIAS e RMSE

Município	BIAS	RMSE
Crato	-0,04	0,05
Forquilha	-0,001	0,04
General Sampaio	0,01	0,04
Guaraciaba do Norte	-0,07	0,06
Jaguaribe	-0,004	0,04
Mauriti	0,03	0,04
Pentecoste	-0,07	0,05
Quixeramobim	-0,01	0,04

Fonte: Autoria própria (2025)

6 CONCLUSÃO

Neste estudo, foi realizada uma validação dos dados do satélite SMOS/MIRAS para 10 estações de monitoramento de umidade do solo in situ. Os resultados mostram que os dados diários do satélite SMOS seguiram a curva de tendência das estações in situ e precipitação. Das 10 estações de estudo, duas foram descartadas (Catarina e Umari), pois havia fortes indícios de problema na estimativa de dados in situ de umidade do solo. Por outro lado, 5 estações obtiveram forte correlação e 3 foram classificadas como moderada pela classificação r de Pearson. Pelo BIAS constatou-se que o satélite SMOS apresentou uma leve tendência em subestimar os dados. O RMSE apresentou variável entre 0,4 e 0,6 para as 8 estações, indicando boa acurácia nos valores obtidos pelo SMOS. As estações de Catarina e Umari apresentaram valores de umidade do solo elevados, no período de estiagem da região, possivelmente o equipamento de coleta in situ do CEMADEM, estava descalibrado nessas localidades. As estações do CEMADEM de Crato, Pentecoste e Guaraciaba do Norte, através do gráfico de série temporal, apresentaram valores superestimados de umidade do solo, pois mesmo com os

pluviômetros da FUNCEME não registrando chuva, os sensores in situ indicavam solo com valores entre 0,10 e 0,20 m³.m⁻³.

Dessa forma, sugere-se expandir o estudo para mais municípios do estado do Ceará, para averiguar tanto a tendência do SMOS em subestimar os dados, como para determinar quais estações in situ do CEMADEM necessitam de calibração.

REFERÊNCIAS

- Barcelona Expert Center. **BEC**, 2025. Disponível em: <https://bec.icm.csic.es/>. Acesso em 20/05/2024.
- BATISTA, G. T.; DIAS, N. **Introdução ao Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2005.
- CÂMARA, G. *et al.* **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: Instituto da Computação, UNICAMP, 1996.
- CAMPBELL, Jeffrey E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 2, p. 332-341, 1990.
- CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. **Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções**. Ceará: Universidade Federal do Ceará 2001.
- CHAMPAGNE, C. *et al.* Monitoring agricultural risk in Canada using L-band passive microwave soil moisture from SMOS. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 1, p. 5-18, 2015.
- COOK, B. I. *et al.* Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. **Earth's Future**, v. 8, n. 6, 2020.
- COSTA, T. A. **Estimativa da umidade do solo na região semiárida do Brasil pelo método do triângulo universal**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017.
- CUI, C. *et al.* Soil moisture mapping from satellites: An intercomparison of SMAP, SMOS, FY3B, AMSR2, and ESA CCI over two dense network regions at different spatial scales. **Remote Sensing**, v. 10, n. 1, p. 33, 2017.
- Earth Observation Missions. **EOPORTAL**, 2024. Disponível em: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/smos#eop-quick-facts-section>. Acesso em: 07/06/2024
- EARTHDATA NASA**. Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E), 2024. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/amr-e>. Acesso em: 07/06/2024
- FIGUEIREDO, D. **Conceitos básicos de sensoriamento remoto**. São Paulo, 2005.
- FIGUEIREDO, F. D.; JÚNIOR, J. A. S. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista política hoje**, v. 18, n. 1, p. 115-146, 2009.
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **FUNCEME**, 2025. Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: 26/07/2024.
- GASCH, C.K. *et al.* A pragmatic, automated approach for retroactive calibration of soil moisture sensors using a two-step, soil-specific correction. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.137, p. 29–40, 2017.

GONÇALVES, L. L. **Influência da Umidade do Solo na Resposta Espectral de Solo Exposto Via Espectrorradiometria de Campo**. 1999. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

Governo do Estado do Ceará. **Ceará.gov**, 2010. Disponível em: <https://www.ceara.gov.br/2010/03/13/ceara-em-numeros/>. Acesso em: 22/01/2025.

GRECO, R.; GUIDA, A. Field measurements of topsoil moisture profiles by vertical TDR probes. **Journal of Hydrology**, v. 348, n. 3-4, p. 442-451, 2008.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Manual of remote sensing: principles and application of imaging radar**. New York: John Wiley & Sons, 1998.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE**, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ce.html>. Acesso em: 20/12/2024.

Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **IPECE**, 2016. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/144x.htm>. Acesso em: 18/02/2025.

JUCÁ, M. V. Q.; SOUZA, A. G. S. S.; NETO, A.R. Avaliação de produtos de sensoriamento remoto de umidade do solo em relação a dados *In situ* em diferentes regiões climáticas de Pernambuco. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2019.

KANG, C.S.; KANNIAH, K.D.; KERR, Y.H.; CRACKNELL, A.P. Analysis of in-situ soil moisture data and validation of SMOS soil moisture products at selected agricultural sites over a tropical region. **International Journal of Remote Sensing**. 2016, 37, 3636–3654.

KERR, Y H. *et al.* The SMOS soil moisture retrieval algorithm. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 5, p. 1384-1403, 2012.

KERR, Y. H. *et al.* The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. **IEEE**, v. 98, n. 5, p. 666-687, 2010.

KERR, Yann H. *et al.* The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle. **IEEE**, v. 98, n. 5, p. 666-687, 2010.

KOSTER, Randal D. *et al.* GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part I: overview. **Journal of Hydrometeorology**, v. 7, n. 4, p. 590-610, 2006.

LEÃO, D. V. F. *et al.* Avaliação e calibração de sensores de monitoramento da umidade superficial do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 26294-26305, 2021.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; KOIDE, S.; SANTOS, R.M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de Latossolos do cerrado em condições de campo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 23-32, 2012.

MARENGO, J. A. *et al.* Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e17, 2022.

MARENGO, J. A. *et al.* Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias estratégicas**, v. 13, n. 27, p. 149-176, 2008.

- MCCOLL, Kaighin A. *et al.* The global distribution and dynamics of surface soil moisture. **Nature Geoscience**, v. 10, n. 2, p. 100-104, 2017.
- MCMULLAN, K. D. *et al.* SMOS: The payload. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 3, p. 594-605, 2008.
- MEDEIROS-FEITOSA, J. R.; OLIVEIRA, C. W. Estudo comparativo dos dados de precipitação do satélite TRMM e postos pluviométricos no estado do Ceará, Brasil. **Revista Geográfica de América Central**, n. 65, p. 239-262, 2020.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.
- MOHANTY, Binayak P. *et al.* Soil moisture remote sensing: State-of-the-science. **Vadose Zone Journal**, v. 16, n. 1, p. 1-9, 2017.
- MONSIVÁIS-HUERTERO, A. *et al.* Impact of temporal variations in vegetation optical depth and vegetation temperature on L-band passive soil moisture retrievals over a tropical forest using in-situ information. **International Journal of Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 2098-2139, 2020.
- NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992.
- OLIVEIRA, M, S.; RIBEIRO NETO, A. Avaliação de produtos de umidade do solo para aplicação na grande escala. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2021.
- OWE, M. *et al.* Estimating soil moisture from satellite microwave observations: Past and ongoing projects, and relevance to GCIP. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 104, n. D16, p. 19735-19742, 1999.
- QUARTAROLI, C. F.; VICENTE, L. E.; ARAUJO, L. S. **Sensoriamento remoto**. Brasília: Embrapa, 2014.
- RODRIGUES, L. N. *et al.* Balanço hídrico climatológico normal de quatro municípios cearenses localizados em diferentes mesorregiões. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, 2023.
- ROSSATO, L. **Estimativa da umidade superficial do solo a partir de sensoriamento remoto por microondas passivo sobre a América do Sul**. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2010.
- ROSSATO, L.; ANGELIS, C. F. Avaliação da umidade do solo em áreas densamente vegetadas sobre o Brasil, utilizando observações do sensor MIRAS/SMOS. **XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 13-18, 2013.
- ROSSATO, Luciana *et al.* Impact of soil moisture on crop yields over Brazilian semiarid. **Frontiers in Environmental Science**, v. 5, p. 73, 2017.
- ROSSATO, Luciana *et al.* Validation of SMOS L3 and L4 soil moisture products in the REMEDHUS (Spain) and CEMADEN (Brazil) networks. **Revista brasileira de geografia física**, v. 13, n. 2, p. 691-712, 2020.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, p. 670-679, 2011.

SENA, C. C. R. S. *et al.* Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo ec-5 em resposta a granulometria do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 4, p. 17228-17240, 2020.

SENEVIRATNE, Sonia I. *et al.* Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 99, n. 3-4, p. 125-161, 2010.

SOUZA, A. G. S. S. *et al.* Use of SMOS L3 soil moisture data: Validation and drought assessment for Pernambuco State, Northeast Brazil. **Remote Sensing**, v. 10, n. 8, p. 1314, 2018.

SOUZA, A. G.S.S. **Índice de seca no estado de Pernambuco utilizando dados de umidade do solo do satélite SMOS**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

STEFFEN, A. C.; MORAES, E. C. Introdução à radiometria. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, VII. Curitiba, 10-14. maio, 1993. Tutorial São José dos Campos. INPE, 1993.

VALENTE, D. C. **Estimativa da umidade superficial do solo em áreas de alta recorrência de fogo no Parque Nacional da Serra da Canastra, a partir de dados orbitais dos sensores OLI e TIRS/Landsat 8**. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Estadual de Campinas, 2023.

VERECKEN, Harry *et al.* On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 76-96, 2014.

WANG, A; LETTENMAIER, D. P.; SHEFFIELD, J. Soil moisture drought in China, 1950–2006. **Journal of Climate**, v. 24, n. 13, p. 3257-3271, 2011.

WANG, L.; QU, J. J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. **Frontiers of Earth Science in China**, v. 3, p. 237-247, 2009.

WANG, Wen *et al.* Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought. **Adv. Meteorol**, 2016.

WIGNERON, J. P. *et al.* Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture. **Agronomie**, v. 18, n. 1, p. 27-43, 1998.

ZHANG, D.; ZHOU, G. Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1308, 2016.