

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Instituto de Geociências

Programa de Pós-graduação em Geografia

Leidiane de Paula Rezende

**ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DE UMIDADE DO SOLO DOS
SATÉLITES SMOS E SMAP COM O NDVI E VARIÁVEIS
ATMOSFÉRICAS**

Belo Horizonte

2023

Leidiane de Paula Rezende

**ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DE UMIDADE DO SOLO DOS
SATÉLITES SMOS E SMAP COM O NDVI E VARIÁVEIS
ATMOSFÉRICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito à obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Análise Ambiental
Linha: Geografia Aplicada e Geotecnologia

Orientador: Dr. Philippe Maillard

Belo Horizonte
2023

R467a
2023

Rezende, Leidiane de Paula.

Análise das estimativas de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP com o NDVI e variáveis atmosféricas [manuscrito] / Leidiane de Paula Rezende. – 2023.

133 f., enc. il. color.

Orientador: Philippe Maillard.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2023.

Área de concentração: Análise Ambiental.

Linha de pesquisa: Geografia Aplicada e Geotecnologias.

Bibliografia: f. 106-113.

Inclui apêndices.

1. Solos – Umidade – Teses. 2. Vegetação e clima – Brasil – Teses. 3. Satélites artificiais – Teses. I. Maillard, Philippe. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 631.4(81):629.783



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ANÁLISE DAS ESTIMATIVAS DE UMIDADE DO SOLO DOS SATÉLITES SMOS E SMAP COM O NDVI E DE SUA DINÂMICA COM VARIÁVEIS ATMOSFÉRICAS E AMBIENTAIS"

LEIDIANE DE PAULA REZENDE

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 25 de maio de 2023, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos seguintes professores:

Philippe Maillard

IGC/UFMG

Fábio Soares de Oliveira

IGC/UFMG

Anderson Luis Ruhoff

UFRGS

Évelyn Márcia Pôssa

Maron Ambiental Ltda

Belo Horizonte, 25 de maio de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Evelyn Marcia Possa, Usuário Externo**, em 26/05/2023, às 09:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Philippe Maillard, Professor do Magistério Superior**, em 30/05/2023, às 08:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fabio Soares de Oliveira, Professor do Magistério Superior**, em 01/06/2023, às 07:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Anderson Luis Ruhoff, Usuário Externo**, em 14/06/2023, às 14:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **2298131** e o código CRC **1E2276EA**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador Dr. Philippe Maillard pelo tempo e dedicação ao projeto. Aos meus professores de graduação Ricardo V. Ferreira (um verdadeiro pai acadêmico), Josenilson B. da Silva e Leandro G. Pinton por todo incentivo e apoio a minha trajetória como estudante, cujo apreço me fizeram dar continuidade a carreira e aos estudos. Sintam se abraçados e segue minha admiração!

A FAPEMIG, pelo apoio financeiro concedido.

A minha mãe, que incansavelmente reza e torce por mim.

RESUMO

Neste estudo foi avaliada as estimativas de umidade do solo dos sensores passivos dos satélites SMOS e SMAP com o NDVI do sensor MODIS, comparando suas médias mensais com dados de precipitação e evapotranspiração, e analisa as características físicas e ambientais a partir de um conjunto de pontos amostrais entre os biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, considerando áreas herbáceas e arbustivas, florestas e áreas de cultivo. Há uma relação direta entre o vigor da vegetação e a umidade do solo, tendo que considerar a zona raiz e o tempo de atraso de resposta da vegetação em relação a disponibilidade de água no solo. Em síntese, o conhecimento do regime da variação da umidade no solo fornece informações essenciais para análise e manejo da irrigação, a escolha da época do plantio, e análise do consumo de água pelas plantas, permitindo melhor gerenciamento dos recursos. O solo é tido como um reservatório potencial de água e a umidade do solo como a variável fundamental do sistema solo-planta-atmosfera. Há poucas unidades de monitoramento de umidade do solo no Brasil e as estimativas de umidade do solo através de Sensoriamento Remoto se apresentam como possível alternativa. Os produtos de umidade do solo obtidos por micro-ondas passivas podem ser associados aos sensores ópticos, que detectam o vigor da vegetação que é intimamente ligada à umidade do solo disponível. Neste estudo foi aplicada a técnica de correlação cruzada para observar o tempo de atraso de resposta da vegetação em relação a umidade de solo, porém os resultados variaram bastante em detrimento as características de cada ponto analisado. As estimativas de umidade do solo e o NDVI estiveram bem correlacionados (0.5 a 0.75) em mais de 85% do conjunto de dados dos 36 pontos analisados. Os coeficientes de regressão entre a umidade do solo, precipitação e evapotranspiração apresentaram valores entre 0.5 e 0.94 para o mesmo conjunto em geral. Foi observado que a textura do solo, as características do relevo e da vegetação são fatores que podem influenciar na relação entre o vigor da vegetação e a umidade do solo, e que os efeitos da ação antrópica relacionada ao manejo e uso da terra pode comprometer a relação das variáveis e a análise por séries temporais. Quanto ao aspecto regional, a umidade do solo seguiu os efeitos sazonais das taxas de precipitação e evapotranspiração, de acordo com o gradiente climático, sem grandes oscilações. Foi concluído que as estimativas de umidade do solo dos satélites são bem representativas em escala regional pois são bem correlacionadas com NDVI, precipitação e evapotranspiração, e representam bem a dinâmica do sistema solo-planta-água-atmosfera.

Palavras-chave: umidade do solo; vegetação; NDVI; SMOS; SMAP.

ABSTRACT

The study evaluates the soil moisture estimates of the passive sensors of the SMOS and SMAP satellites with the NDVI of the MODIS sensor, comparing their monthly averages with precipitation and evapotranspiration data, and analyzes the physical and environmental characteristics from a set of sample points between the Cerrado, Caatinga and Atlantic Forest biomes, considering herbaceous and shrubby areas, forests and cultivated areas. There is a direct relationship between vegetation vigor and soil moisture, having to consider the root zone and the delay time of vegetation response in relation to the availability of water in the soil. In summary, knowledge of the soil moisture variation regime provides essential information for the analysis and management of irrigation, the choice of planting time, and analysis of water consumption by plants, allowing better management of resources. Soil is seen as a potential reservoir of water and soil moisture as the fundamental variable of the soil-plant-atmosphere system. There are few soil moisture monitoring units in Brazil and soil moisture estimates through Remote Sensing are a possible alternative. Soil moisture products obtained by passive microwaves can be associated with optical sensors, which detect vegetation vigor which is closely linked to available soil moisture. In this study, the cross-correlation technique was applied to observe the vegetation response delay time in relation to soil moisture, but the results varied greatly to the detriment of the characteristics of each point analyzed. Soil moisture estimates and the NDVI were well correlated (0.5 to 0.75) in more than 85% of the dataset of the 36 points analyzed. The regression coefficients between soil moisture, precipitation and evapotranspiration showed values between 0.5 and 0.94 for the same set in general. It was observed that the texture of the soil, the characteristics of the relief and the vegetation are factors that can influence the relationship between the vigor of the vegetation and the soil moisture, and that the effects of anthropic action related to the management and use of the land can compromise the relationship of variables and analysis by time series. As for the regional aspect, soil moisture followed the seasonal effects of precipitation and evapotranspiration rates, according to the climatic gradient, without major oscillations. It was concluded that the soil moisture estimates from the satellites are very representative on a regional scale as they are well correlated with NDVI, precipitation and evapotranspiration, and represent well the dynamics of the soil-plant-water-atmosphere system.

Keywords: soil moisture; vegetation; NDVI; SMOS; SMAP.

LISTA DE FIGURAS

2.1	As principais interações que levam ao acoplamento umidade-temperatura do solo e feedbacks umidade-temperatura do solo. Fonte: (Seneviratne <i>et al.</i> , 2010)	19
2.2	Representação simplificada dos processos que contribuem para o acoplamento umidade-precipitação do solo e feedback umidade-precipitação do solo. Fonte: (Seneviratne <i>et al.</i> , 2010).....	19
2.3	Curva de retenção da água no solo. Fonte: Tolentino Jr. (2022).....	21
2.4	Assinaturas espectrais de diferentes características da Terra dentro do espectro de luz visível. Fonte: NASA (2023).....	22
2.5	Diagrama do espectro eletromagnético. Fonte: NASA (2023).....	23
2.6	Imagens da NASA Earth Observatory usando dados Landsat. Fonte: NASA (2023).....	24
2.7	Imagem Landsat 8 de Reykjavik, Islândia, ilustrando a diferença na resolução de pixels - NASA Earth Observatory. Fonte: NASA (2023).....	25
2.8	Espectro eletromagnético. Fonte: Souza (2019), adaptado do Portal Ponto Ciência, 2012).....	26
2.9	Diagrama de um sensor passivo. Fonte: NASA (2023)	28
2.10	Figura ilustrativa do modelo do NDVI e a faixa infravermelha. Fonte: GIS Geography (2023).....	37
2.11	Fitofisionomias do Cerrado. Fonte: Embrapa (2023)	41
2.12	Perfil esquemático de cinco tipos de vegetação. Fonte: IBGE	44
3.1	Localização das estações in-situ com dados de umidade do solo da Rede COSMOS, do Parque Estadual de Passununga – Santa Rita de Passa Quatro, SP e CPTEC/INPE – Cachoeira Paulista, SP	45
3.2	O satélite SMOS em órbita	46
3.3	O satélite SMAP em órbita e sua configuração. Fonte: NASA	48
3.4	Distribuição espacial dos 36 pontos das coberturas vegetais de biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica - Classificação de Cobertura da Terra Copernicus.	55
3.5	Mapa da Classificação Climática de Koppen	57

LISTA DE GRÁFICOS

- 4.1 Gráficos de dispersão com a média mensal dos dados de umidade do solo de campo e do SMOS: a) estação CPTEC, b) estação Pé de Gigante..... 62
- 4.2 Gráficos do resultado da correlação cruzada entre a umidade do solo in-situ e o NDVI de 1km para as estações CPTEC/INPE e Pé de Gigante, representado o período de decalagem. 64
- 4.3 Gráficos das séries temporais representando o índice da vegetação e a umidade do solo das estações CPTEC/INPE e Pé de Gigante. 66
- 4.4 Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas herbáceas dos três biomas: melhores correlações. 71
- 4.5 Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas arbustivas dos três biomas: melhores correlações. 72
- 4.6 Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas florestais dos três biomas: melhores correlações. 73
- 4.7 Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de áreas de cultivo dos três biomas: melhores correlações. 74
- 4.8 Gráficos das correlações e decalagem das coberturas herbáceas a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas. 77
- 4.9 Gráficos das correlações e decalagem das coberturas arbustivas a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas. 78
- 4.10 Gráficos das correlações e decalagem das coberturas florestais a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas. 78
- 4.11 Gráficos das correlações e decalagem de áreas de cultivo a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas. 79
- 4.12 Gráficos das correlações e decalagem de uma área de cultivo do bioma Mata Atlântica a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI. 79
- 4.13 Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI..... 82
- 4.13 (continuação) Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI 83
- 4.13 (continuação) Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI 84
- 4.14 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspi-

ração para duas áreas de herbácea em dois biomas.....	87
4.15 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de herbácea na Mata Atlântica e uma área arbustiva no Cerrado.....	88
4.16 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área arbustiva na Caatinga e na Mata Atlântica.....	89
4.17 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de floresta no Cerrado e uma área de floresta na Caatinga.	90
4.18 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma uma área de floresta na Mata Atlântica e uma área de cultivo no Cerrado.....	91
4.19 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de cultivo na Caatinga e na Mata Atlântica.....	92
4.20 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de herbácea no Cerrado.	94
4.21 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas herbáceas na Caatinga	95
4.22 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de herbáceas na Mata Atlântica.....	96
4.23 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de floresta na Caatinga	97
4.24 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de florestas na Mata Atlântica	99
4.25 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de cultivo no Cerrado	100
4.26 Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de cultivo na Mata Atlântica	101

LISTA DE TABELAS

2.1	Limites de disponibilidade total de água (DTA) para solos de diferentes texturas. Fonte: Tolentino Jr. (2022)	21
3.1	Especificação das bandas do sensor MODIS	51
4.1	Tabela de Resultados: Correlação Cruzada e Regressão Múltipla.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Dinâmica da umidade do solo.....	17
2.2	Princípios de Sensoriamento Remoto.....	22
2.3	Sensoriamento remoto aplicado à umidade do solo.....	25
2.4	Sensores Passivos e estimativa de umidade do solo.....	29
2.5	Validação de produtos SMOS e SMAP.....	30
2.6	Estudos realizados com o SMOS e o SMAP no Brasil.....	32
2.7	Índices de vegetação e umidade do solo.....	36
2.8	Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica.....	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Dados SMOS.....	45
3.2	Dados SMAP.....	47
3.3	Dados de umidade do solo de campo.....	49
3.4	Sensor MODIS e NDVI.....	50
3.5	Dados de Precipitação - GPM.....	51
3.6	Dados de Evapotranspiração Total (ET) - FLDAS.....	53
3.7	Análise Regional.....	55
3.8	Classificação climática regional.....	56
3.9	Produção de séries temporais.....	57
3.10	Processamentos.....	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	Validação das estimativas de umidade do solo do SMOS e in-situ.....	62
4.2	Relação da umidade do solo in-situ e o NDVI.....	64
4.3	Relação da umidade do solo estimada (SMOS e SMAP) e o NDVI.....	66
4.3.1	Umidade do solo e NDVI.....	66
4.3.2	O tempo de resposta da vegetação.....	75
4.4	Análise das características ambientais.....	80
4.5	Análise da médias mensais: umidade do solo, precipitação e evapotranspiração.....	85
4.6	Avaliação dos sensores.....	102
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104

6 REFERÊNCIAS	106
APÊNDICES	114
Apêndice A - Quadro das características físicas e ambientais.....	115
Apêndice B - Mapa de Classificação de Solos de acordo com as classes definidas pelo IBGE	120
Apêndice C - Gráficos temporais das médias mensais de umidade do solo, precipitação e evapotranspiração	121
Apêndice D - Artigo completo apresentado no XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, abril 2023, Florianópolis – SC	129

INTRODUÇÃO

A umidade do solo é uma variável importante no balanço hídrico e equilíbrio de energia da superfície da Terra. É um fator determinante em processos como evapotranspiração, infiltração, escoamento superficial, fluxo subterrâneo, além de contribuir para a composição e diversificação da vegetação (Nascimento, 2002; Liu *et al.*, 2012; Costa, 2017; Portal *et al.*, 2020). Sua distribuição é controlada por fatores climatológicos e ambientais e de uso antrópico (cultura e manejo do solo) e por isso deve ser monitorada com a mesma frequência que outras variáveis ambientais importantes (Qiu *et al.*, 2001; JPL - Jet Propulsion Laboratory - NASA, 2012; Araújo *et al.*, 2018).

Analisar a distribuição da umidade do solo é importante para melhor gestão dos recursos hídricos. Previsões de seca, mudanças no clima, do tempo, e produtividade agrícola, requerem informações sobre o estado da umidade do solo. É uma variável fundamental para aprimorar modelos hidrológicos de previsão da precipitação e ocorrência de enchentes e secas (Juca *et al.*, 2019). É importante também para analisar a saúde da vegetação e a dinâmica ecossistêmica. Na agricultura, o conhecimento da umidade do solo pode colaborar para o planejamento agrícola (Ribeiro *et al.*, 2019).

De acordo com Silva (2018), na agricultura, o conhecimento do regime da variação da umidade no solo fornece informações essenciais para análise e manejo da irrigação, escolha da época do plantio, análise do consumo de água pelas plantas, estudo de processos de transferência de água, calor e nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera, e planejamento e controle dos sistemas de drenagem. A determinação dos teores de umidade no perfil do solo é imprescindível e possibilita o uso racional da água por meio da otimização de algumas operações do dia a dia, ligadas principalmente ao manejo de irrigação (Nascimento, 2002).

A irrigação possibilita o manejo eficiente do sistema solo-água-planta-atmosfera. No entanto, de acordo com Brito *et al.* (2010), a prática de irrigação pode modificar o meio ambiente local ou até mesmo regional, dada a necessidade de captação e da construção de reservatórios, além disso, altera os parâmetros de qualidade da água, causa degradação do solo devido ao uso inadequado, gera contaminação dos recursos hídricos, e contribui para o processo de salinização do solo.

A determinação da umidade do solo é dada através do conteúdo de água no solo ou pelo potencial de água no solo. O conteúdo de água no solo é obtido pela razão da massa ou volume

de água pela massa ou volume total de solo, enquanto o potencial de água no solo descreve o status de energia da água no solo (Maske, 2016).

Para Seneviratne *et al.* (2010), a umidade do solo é geralmente definida como a água contida na zona insaturada do solo e a definição da umidade do solo depende da caracterização do volume do solo. O teor de umidade do solo não é distribuído vertical e horizontalmente de forma homogênea e portanto, difere para diferentes volumes de solo. Entender essa premissa é interessante para análise das estimativas, principalmente para as baseadas em sensoriamento remoto.

Dada a importância da umidade do solo, torna-se essencial o monitoramento contínuo e a agilidade na estimativa. Surge daí a possibilidade de utilizar produtos de sensoriamento remoto (Nascimento, 2002). Métodos de medições de umidade do solo em campo e laboratório são observações pontuais e não permitem mensurar a variabilidade regional da umidade do solo devido sua heterogeneidade, além de ser custoso no Brasil.

O uso do sensoriamento remoto é um dos principais avanços que permite a caracterização regional de umidade do solo de camadas superficiais. Considerando que há poucas redes de umidade de solo in-situ monitoradas com frequência e a necessidade de espacialização dos dados para grandes áreas e outras camadas subsuperficiais do solo (Liu *et al.*, 2012; Maske, 2016; Costa, 2017), os produtos de sensoriamento remoto e ferramentas dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), apresentam grande potencial de análise e estimativa da umidade do solo (Souza, 2019).

Os sensores remotos utilizados para a medição da umidade do solo abrangem uma ampla extensão do espectro eletromagnético, desde a região de micro-ondas até a região óptica. Os sensores de micro-ondas, permitem a estimativa da umidade superficial do solo sob diversas condições ambientais, mesmo com interferência da atmosfera na aquisição dos dados da superfície e variabilidade do relevo (Costa, 2017).

A estimativa da umidade do solo pode ser feita por sensores de micro-ondas passivas e ativas (Maske, 2016). Sensores ativos geram sua própria energia eletromagnética e não sofrem muito com a interferência atmosférica. Já os radiômetros (sensores passivos) registram a energia natural emitida pela superfície da Terra, denominada de temperatura de brilho, cuja estimativa é possível devido à relação direta entre a umidade do solo e a emissividade da superfície terrestre. Por isso os radiômetros têm apresentado grande potencial para monitorar variáveis hidrológicas globais como a umidade do solo (Souza, 2019).

Dentre as missões mais recentes de micro-ondas passivas, estão o Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) e o Soil Moisture Active and Passive (SMAP). Esses sensores operam na banda L e sofrem menos interferência da influência da vegetação e atmosfera em relação às bandas C e X de outros sensores, sendo ideais para estimativa da umidade do solo em escalas maiores, principalmente (Souza, 2019; Portal *et al.*, 2020).

Os produtos de umidade do solo obtidos por micro-ondas passivas podem ser associados a outros sistemas de sensoriamento remoto, como os sensores ópticos, que detectam o estresse da vegetação (Souza, 2019). Os sensores remotos no intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas tem se mostrado bastante operacionais devido à vasta disponibilidade de imagens da superfície terrestre com diferentes resoluções espaciais (Nascimento, 2002).

Medições por meio de sensores ópticos ou termais podem ser consideradas como métodos indiretos de estimativa de umidade do solo. Os sensores ópticos são aplicados principalmente relacionando índices de faixas de comprimentos de onda com informações refletidas por diferentes alvos da superfície do solo. A vantagem desses sensores em relação aos de micro-ondas reside principalmente na escala (Costa, 2017).

Embora os sensores ópticos não possam medir diretamente a umidade do solo na zona raiz, eles fornecem informações relevantes sobre o tipo e estado da vegetação, e a análise e quantificação das informações de detecção remota da vegetação em várias resoluções espaciais, temporais e espectrais, pode permitir o monitoramento da umidade do solo em grandes escalas (Liu *et al.*, 2012).

Santos (2014) considera o vigor da vegetação uma variável interessante para estimar a umidade em zonas mais profundas do solo, uma vez que se encontra associado a zona raiz de extração de água pelas plantas. Em estudos como o de Liu *et al.* (2012) e Schnur *et al.* (2010), foi utilizado o controle exercido pela umidade do solo na zona radicular sobre o vigor da planta, medido por índices de vegetação, para estimar a variação da umidade do solo na zona raiz. Segundo Schnur *et al.* (2010), a planta ajusta seus processos biológicos para coincidir com a condição local do clima e disponibilidade de água. No entanto, é preciso considerar que a planta necessita de um tempo para responder às modificações do ambiente, que é determinado como o “tempo de atraso de resposta”.

1.1 Objetivos

O estudo apresenta como proposta, analisar as estimativas de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP, as quais são relacionadas com o índice de vegetação (NDVI) do sensor MODIS para diversas regiões do Brasil em biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. O estudo considera a relação existente entre umidade do solo, precipitação e evapotranspiração, e como etapa final, avalia como estão relacionadas estas taxas em regimes mensais. Especificamente foram identificados três subobjetivos principais atreladas a avaliação das estimativas: tempo de resposta da vegetação; a relação da umidade do solo com o tipo de vegetação; influência de variáveis ambientais e climatológicas na análise.

Tempo de resposta da vegetação: Uma boa correlação entre a umidade do solo estimada e o NDVI calculado representa que a umidade do solo estimada pelos sensores é significativa. No entanto, pode levar um tempo para a vegetação responder de fato a umidade do solo, que na literatura é tido como "tempo de atraso de resposta da vegetação"(decalagem ou defasagem). Essa defasagem em relação a umidade do solo pode variar em função de diversos fatores e são avaliados neste estudo.

A relação da umidade do solo com o tipo de vegetação: Sabemos que a umidade do solo condiciona o vigor da vegetação e que o tempo de resposta pode variar em função do tipo de vegetação. Espécies arbóreas podem, devido a extensão de raízes, serem mais adaptadas à condições de secas. Áreas densamente vegetadas podem restringir o fluxo de umidade para a atmosfera, e com isso conseguem manter seu vigor por mais tempo. Áreas menos densas e cobertas por vegetações mais rasteiras sofrem mais com os efeitos de mudanças atmosféricas, incidência de raios solares, aumento da temperatura, baixa umidade do ar, entre outros. Caso ocorra perda de umidade do solo superficial, e for a camada em contato com as raízes, o vigor da planta pode ser alterado em períodos menores do efeito sazonal.

Influência de variáveis ambientais e climatológicas na análise: A umidade do solo tem relação direta com a precipitação e evapotranspiração, e estando bem correlacionadas com essas variáveis, as estimativas de umidade do solo podem ser altamente validadas. Alguns autores têm destacado o efeito memória da umidade do solo e outros têm apresentado boas relações em função do efeito sazonal dessa variável. Tais considerações levam em conta o componente de grande escala ligado aos eventos de precipitação e evapotranspiração, contrafatores de pequena escala ligados ao relevo e a interação entre solo e vegetação.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Dinâmica da umidade do solo

A umidade do solo desempenha papel importante na interface solo-atmosfera, atuando na partição dos fluxos de água e energia. Devido a sua interação com as demais variáveis do ciclo hidrológico e atuação na escala de tempo, de curto a longo prazo, ela se torna uma variável de interesse para diversas áreas como agricultura, engenharia civil, ecologia, planejamento urbano etc. (Maske, 2016).

De acordo com Maske (2016), o solo é um reservatório importante de água para a atmosfera e o conteúdo de água presente no solo, possui variação lenta e pode causar um efeito "memória" de umidade do solo. Entender esse conceito, traz implicações importantes para a previsão sazonal e dinâmica temporal (períodos mais longos).

Segundo Maske (2016), a umidade do solo tem relação direta com a precipitação e evapotranspiração. Cerca de 70% da precipitação que chega à superfície terrestre é retornada para a atmosfera através da evapotranspiração. O aumento da umidade do solo aumenta a evapotranspiração, o que auxilia no aumento da convecção local e fortalece a circulação de grande escala, causando precipitação que por sua vez leva ao aumento da umidade do solo. É um processo de retroalimentação entre a umidade do solo e a precipitação.

A relação inversa também é válida da mesma forma, onde a anomalia negativa de precipitação causa redução da umidade do solo e a umidade do solo como mecanismo de resposta restringe o fluxo de umidade para a atmosfera. Como a umidade do solo é uma variável de variação lenta, as repostas não são imediatas, tornando esses mecanismos de troca relevantes em processos de escala sazonal e intra-sazonal, como eventos de cheias ou secas (Maske, 2016).

De acordo com Seneviratne *et al.* (2010), um impacto importante da umidade do solo no clima próximo à superfície, está relacionado às mudanças na temperatura do ar, pois sempre que a umidade do solo limita a energia total usada pelo fluxo de calor latente, mais energia está disponível para aquecimento sensível, induzindo um aumento da temperatura do ar na superfície (Seneviratne *et al.*, 2010).

O esquema abaixo representado pela Figura 2.1 ilustra a dinâmica umidade-temperatura. A relação (A) refere-se à ligação entre a umidade do solo e a evapotranspiração (espera-se que esta ligação seja mais forte em zonas de transição entre climas secos e úmidos); a relação (B) relaciona-se com a ligação entre a evapotranspiração e o fluxo de calor sensível (o último afetando a temperatura do ar). Observa-se que a diminuição da evapotranspiração leva a um

aumento no fluxo de calor sensível e, portanto, a um aumento na temperatura do ar; a relação (C) refere-se a um feedback positivo potencial que leva a um aumento adicional de temperatura.

Neste aspecto, o aumento da temperatura leva a um aumento potencial na evapotranspiração (apesar das condições secas), possivelmente levando a uma diminuição adicional na umidade do solo. O ciclo pode continuar até a secagem total do solo, quando os aumentos de temperatura não podem ser amortecidos por nenhum aumento adicional na evapotranspiração (Seneviratne *et al.*, 2010).

Já o modelo esquemático da Figura 2.2 explica a relação umidade-precipitação: (A) se refere à interação entre umidade do solo e evapotranspiração (maior umidade do solo levando a maior evapotranspiração); (B) a relação entre as anomalias de evapotranspiração e as subsequentes anomalias de precipitação (maior evapotranspiração levando a maior precipitação); (C) a relação entre precipitação e subsequentes anomalias de umidade do solo (maior precipitação levando a maior umidade do solo). O acoplamento umidade-precipitação do solo refere-se às etapas (A) e (B), enquanto o feedback da umidade-precipitação do solo refere-se ao ciclo completo (A-C).

De acordo com Seneviratne *et al.* (2010), a relação (C) pode ser dada como trivial embora haja algumas exceções. Por exemplo, precipitação sobre solos muito úmidos ou saturados, pode resultar em escoamento em vez de umidade do solo, e da mesma forma, em casos de precipitação intensa, quando a taxa de precipitação é maior do que a taxa de infiltração. Por outro lado, em regiões de seca mais intensas, os solos podem apresentar rachaduras nas quais a precipitação se infiltra, contornando a zona de superfície. Sob certas condições, o ar também pode estar tão seco que a chuva evapora antes de atingir a superfície (um efeito que pode ser significativo em regiões áridas). Salvo essas exceções, supõe-se que a relação positiva (C) seja válida.

Na relação (A) em termos de retroalimentação umidade-precipitação, conforme indicado pela seta vermelha, existe potencialmente uma retroalimentação negativa neste nível, uma vez que o aumento da evapotranspiração diminui a umidade disponível do solo. Nesse caso, o aumento da precipitação precisa ser pelo menos equivalente ao aumento da evapotranspiração, caso contrário, o efeito será uma redução da anomalia original de umidade do solo. A relação (B) é o elo mais incerto do acoplamento/feedback umidade-precipitação do solo (Seneviratne *et al.*, 2010).

Segundo Seneviratne *et al.* (2010), alguns estudos têm identificado uma relação positiva entre o aumento da umidade do solo e a evapotranspiração de um lado e a precipitação do outro

lado, outros sugerem que sob condições específicas, a instabilidade convectiva e/ou a formação de nuvens podem ser mais fortes sobre solos secos. Portanto, essa relação pode ser vista como a etapa crucial no ciclo de retroalimentação umidade do solo-precipitação.

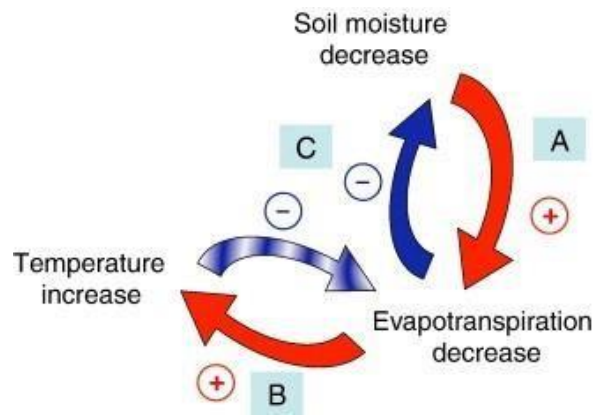


Figura 2.1: As principais interações que levam ao acoplamento umidade-temperatura do solo e feedbacks umidade-temperatura do solo. Fonte: (Seneviratne *et al.*, 2010).

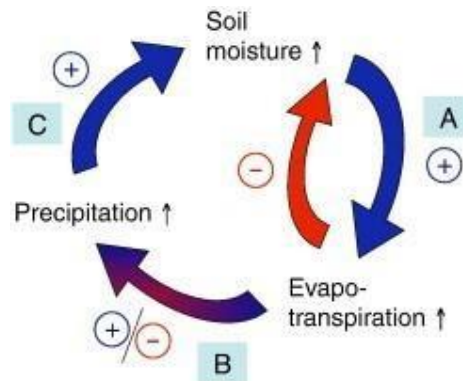


Figura 2.2: Representação simplificada dos processos que contribuem para o acoplamento umidade-precipitação do solo e feedback umidade-precipitação do solo. Fonte: (Seneviratne *et al.*, 2010).

O solo é considerado o principal meio de transporte e armazenamento da água. Nas camadas de solo que ficam mais próximas à superfície, os processos de movimentação da água se dão por meio da infiltração, evaporação, absorção (pelas plantas), redistribuição e drenagem. Esses processos ocorrem de maneira dinâmica e justifica a importância do detalhamento espaço-temporal do monitoramento da umidade do solo. No caso de áreas florestadas, o teor de água do solo se torna essencial para a compreensão das relações entre solo-planta-atmosfera e da percolação para recarga subterrânea (Silva, 2018).

De acordo com Benjamin *et al.* (2008), os efeitos combinados das condições atmosféricas, características do solo, material de origem do solo, topografia, uso do solo e tempo, estão diretamente relacionados com a umidade do solo. Cabe destacar as características da vegetação, como tipo e idade, que afetam a estrutura do solo, podendo alterá-lo de maneira física e quimicamente. Segundo Silva (2018), a variabilidade horizontal da umidade do solo é afetada principalmente pela parcela de água que não é interceptada pelo dossel e pelo escoamento no tronco das árvores, enquanto a variabilidade vertical está associada principalmente às características físicas do solo e, especialmente, a distribuição do sistema radicular.

Para Romano (2014), o monitoramento contínuo da umidade do solo pode auxiliar no desenvolvimento de estratégias de uso sustentável da água na irrigação e na agricultura de precisão. De acordo com Melo *et al.* (2017) o padrão espacial da umidade do solo pode ser representado por uma componente de pequena escala associada com as interações solo e vegetação com o relevo, e uma componente de grande escala associada com a precipitação e evapotranspiração.

O conteúdo de água no solo pode ser expresso com base na massa (ou volume), e é definida como a razão entre a massa (ou volume) de água contida no solo em um determinado instante e a massa (ou volume) do solo seco. A razão de saturação de um solo é definida como a relação entre o volume da água e o volume total de poros. Quando o volume de poros está totalmente cheio de água, diz-se que o solo está saturado, e a razão de saturação é de 100% (Tolentino Jr., 2022).

De acordo com Tolentino Jr. (2022), em termos técnicos gerais, a água no solo está sujeita a forças de diferentes origens e intensidade, resultando no chamado potencial da água no solo. O potencial total da água no solo é composto pelo componente mátrico (que resulta dos efeitos combinados dos fenômenos da capilaridade e adsorção dentro da matriz do solo quando este se apresenta não saturado); osmótico (determinado pela presença de solutos na água); pressão (definido pela pressão hidrostática de uma coluna de água formada em um solo saturado) e gravitacional (determinado pela posição relativa do ponto de medição). A relação fundamental entre o conteúdo de água no solo e o potencial mátrico é chamada curva de retenção da água no solo (Figura 2.3).

A água no solo não é dinâmica e movimenta-se em função do gradiente de potencial entre dois pontos. Para Tolentino Jr. (2022), a água disponível para a planta representa a quantidade de água que um solo retém em um determinado momento. De modo geral, são

definidos um limite superior e um limite inferior de disponibilidade de água no solo. O limite inferior é conhecido como ponto de murcha permanente, considerando que a planta não é capaz de retirar água do solo quando a umidade está abaixo do ponto de murcha. O limite superior é chamado de capacidade de campo e varia em função da cobertura, tipo de solo e demanda da atmosfera. Também se considera que as plantas não conseguem aproveitar a água do solo retida acima da capacidade de campo, pois é drenada rapidamente. No caso da agricultura irrigada, são imprescindíveis informações da cultura, como a profundidade efetiva do sistema radicular e sensibilidade ao estresse hídrico.

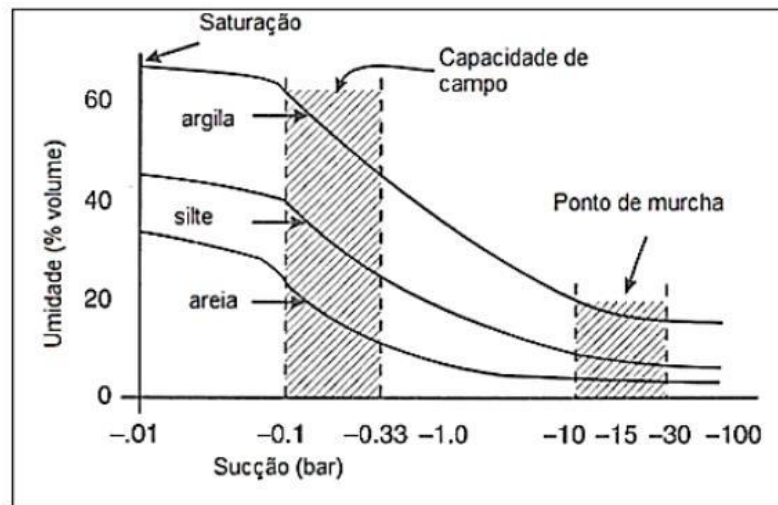


Figura 2.3: Curva de retenção da água no solo. Fonte: Tolentino Jr. (2022).

Textura	DTA (mm/cm)
Grossa	0,4 a 0,8
Média	0,8 a 1,6
Fina	1,2 a 2,4

Tabela 2.1: Limites de disponibilidade total de água (DTA) para solos de diferentes texturas. Fonte: Tolentino Jr. (2022).

A disponibilidade total de água no solo é uma característica do solo (Tabela 2.1) que corresponde à água armazenada no intervalo entre os limites inferior e superior. Já a capacidade total de água no solo corresponde à disponibilidade de água até uma determinada profundidade, e é também conhecida como capacidade de água disponível ou simplesmente água disponível. Para Tolentino Jr. (2022) é possível considerar a profundidade do perfil do solo, mas é mais comum considerar a profundidade efetiva do sistema radicular (a profundidade que contém pelo

menos 80% do sistema radicular). Por fim, a capacidade real de água no solo é definida como a fração da capacidade total de água no solo (também conhecida como água facilmente disponível) que a planta pode utilizar sem afetar sua fenologia.

2.2 Princípios de Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é caracterizado pela aquisição de informações à distância. O registro de informações é feito por meio de sensores remotos em satélites e aeronaves que detectam e registram a energia refletida ou emitida. Sensores remotos fornecem uma perspectiva global e riqueza de dados sobre os sistemas da Terra e permitem a tomada de decisões a partir desses dados com base no estado atual e futuro do planeta.

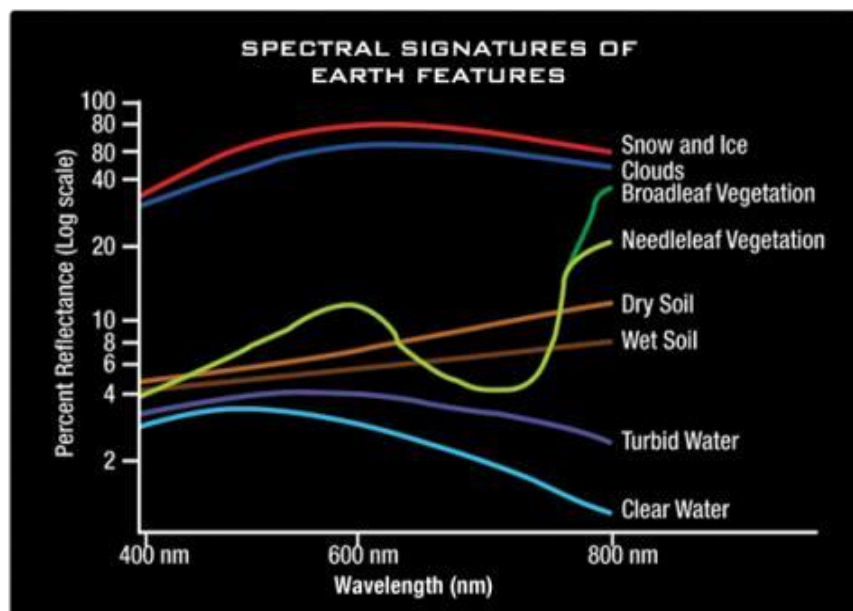


Figura 2.4: Assinaturas espectrais de diferentes características da Terra dentro do espectro de luz visível. Fonte: [NASA \(2023\)](#).

O princípio do sensoriamento remoto se baseia no sentido que todas as superfícies na Terra, refletem, absorvem ou transmitem energia, cuja quantidade varia de acordo com o comprimento de onda. A fonte primária da energia observada pelos satélites é o Sol. A quantidade de energia do Sol refletida depende da rugosidade da superfície e de seu albedo, que é o quão bem uma superfície reflete a luz em vez de absorvê-la, portanto, alguns corpos podem absorver ou refletir mais, e na maioria das vezes, quando absorvida ela é reemitida em comprimento de onda em função principalmente da sua temperatura (lei de Stefan-Boltzmann).

O número de bandas espectrais detectadas por um determinado instrumento, ou seja, sua capacidade espectral, determina o grau de diferenciação que um pesquisador pode identificar entre os alvos, baseando em suas assinaturas espectrais (Figura 2.4) (NASA, 2023).

A energia eletromagnética, produzida pela vibração de partículas carregadas, viaja na forma de ondas pela atmosfera e pelo vácuo do espaço. Essas ondas têm diferentes comprimentos e frequências. Um comprimento de onda mais curto significa uma frequência mais alta. Algumas, como rádio, micro-ondas e ondas infravermelhas, têm um comprimento de onda mais longo, enquanto outras, como ultravioleta, raios-x e raios gama, têm um comprimento de onda muito mais curto. A luz visível fica no meio dessa faixa de radiação de ondas longas a curtas. Essa pequena porção de energia é tudo o que o olho humano é capaz de detectar (Figura 2.5). Para detectar todas as outras formas de energia eletromagnética fazem-se necessário instrumentação como as dos sensores (NASA, 2023).

Sensores ou instrumentos a bordo de satélites e aeronaves usam o Sol como fonte de iluminação ou fornecem sua própria fonte de iluminação, medindo a energia que é refletida de volta. Sensores que usam energia natural do Sol ou a energia emitida pela terra (infravermelho termal e micro-ondas) são chamados de sensores passivos, e aqueles que fornecem sua própria fonte de energia são chamados de sensores ativos. A resolução determina como os dados de um sensor podem ser usados. A resolução pode variar dependendo da órbita do satélite e do design do sensor. Existem quatro tipos de resolução a serem considerados para qualquer conjunto de dados: radiométrico, espacial, espectral e temporal.

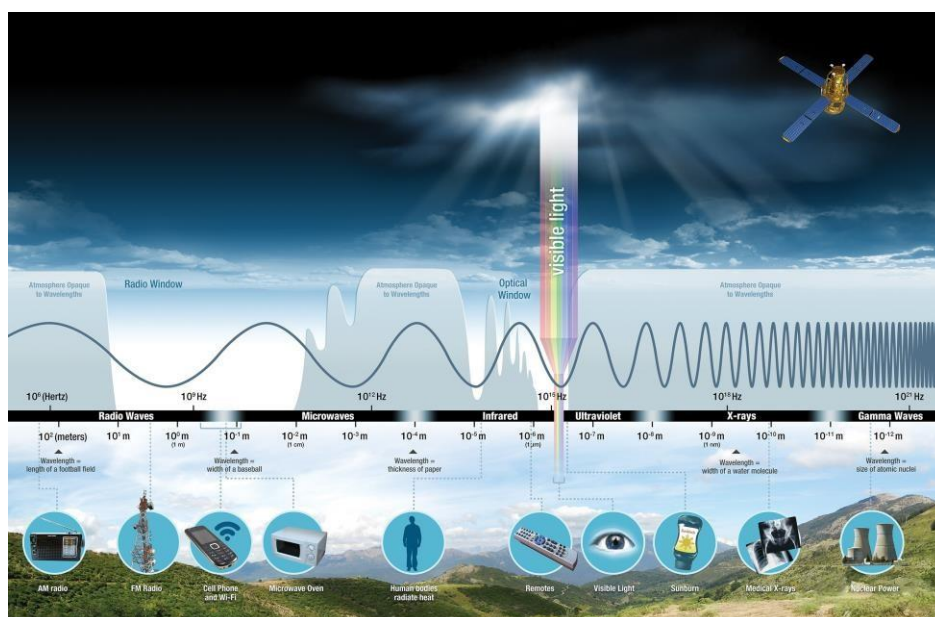


Figura 2.5: Diagrama do espectro eletromagnético. Fonte: NASA (2023).

A resolução radiométrica (Figura 2.6) é a quantidade de informação em cada pixel, ou seja, o número de bits que representa a energia registrada. Assim, quanto melhor a resolução radiométrica, mais valores estarão disponíveis para armazenar informações, proporcionando melhor discriminação até mesmo entre as menores diferenças de energia. A resolução espacial (Figura 2.7) é definida pelo tamanho de cada pixel dentro de uma imagem digital e a área na superfície da Terra representada por esse pixel. Quanto mais fina a resolução (quanto menor o número), mais detalhes você pode ver.

A resolução espectral é a capacidade de um sensor de discernir comprimentos de onda mais finos. Muitos sensores são considerados multiespectrais, o que significa que possuem de 3 a 20 bandas (esse número varia entre diferentes autores). Alguns sensores têm centenas ou mesmo milhares de bandas e são considerados hiper espectrais. A princípio, quanto mais estreita a faixa de comprimentos de onda para uma determinada banda, mais fina a resolução espectral.

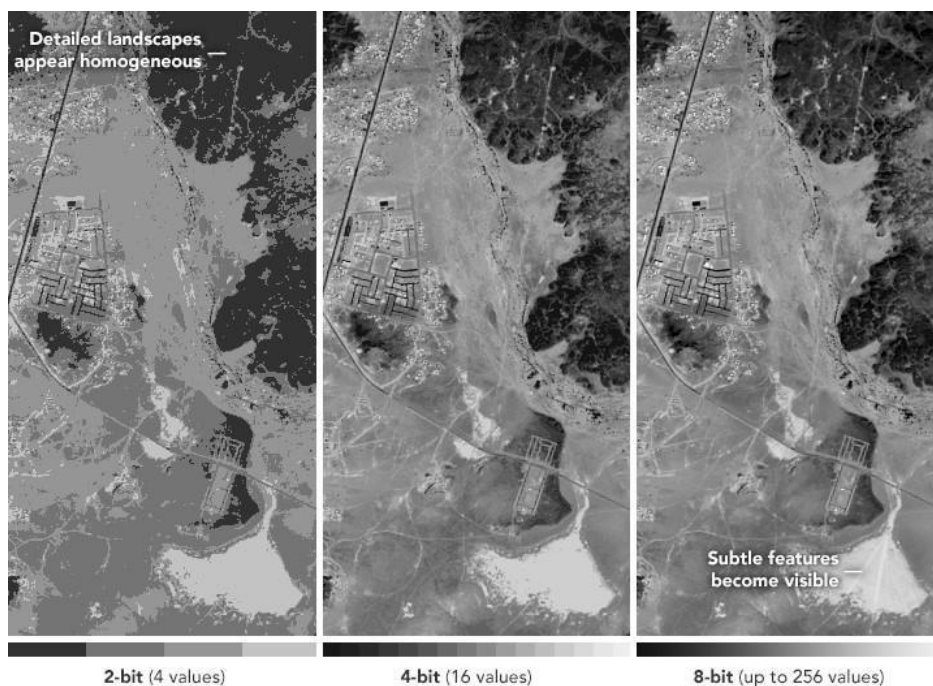


Figura 2.6: Imagens da NASA Earth Observatory usando dados Landsat. Fonte: [NASA \(2023\)](#).

A resolução temporal é o tempo que leva para um satélite completar todas as órbitas e visitar a mesma área de observação. Essa resolução depende da órbita, das características do sensor e da largura da faixa. Os satélites geoestacionários correspondem à taxa de rotação da Terra, e sua resolução temporal é muito mais precisa, já os satélites em órbita polar têm uma resolução temporal que pode variar de 1 dia a 16 dias (Landsat). Certas missões utilizam vários

satélites idênticos para reduzir o tempo de retorno (p. ex. Landsat-8 e -9 permitem um retorno a cada 8 dias).

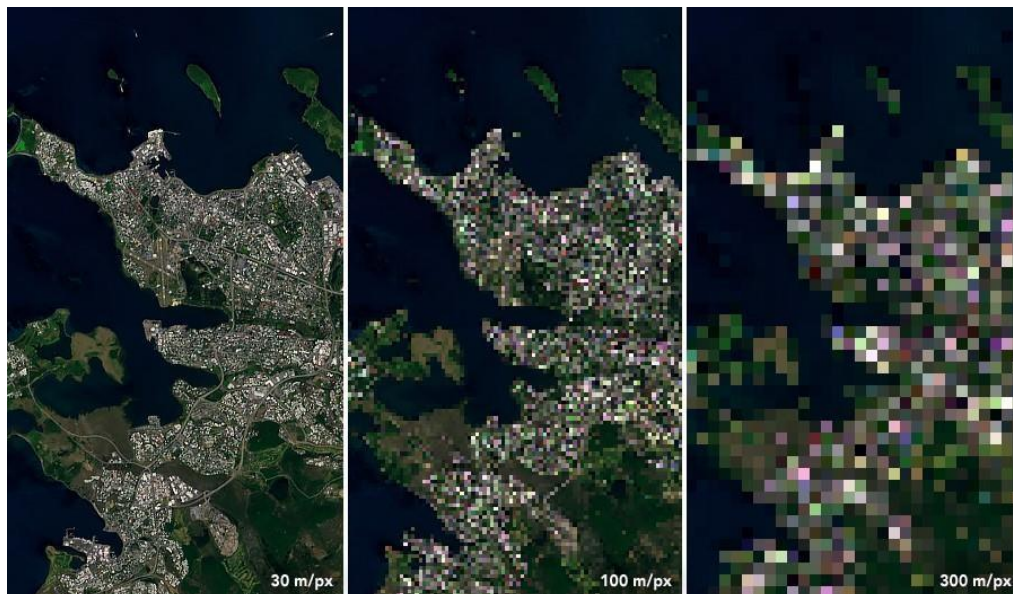


Figura 2.7: Imagem Landsat 8 de Reykjavik, Islândia, ilustrando a diferença na resolução de pixels - NASA Earth Observatory. Fonte: [NASA \(2023\)](#).

2.3 Sensoriamento remoto aplicado à umidade do solo

Os sensores remotos obtêm informações de diversos componentes hidrológicos e ambientais como a precipitação e evapotranspiração, o vigor da vegetação, umidade do solo, temperatura da superfície, e tantos outros ([Souza, 2019](#)). As estimativas com base em sensores remotos têm a vantagem de sua ampla distribuição e cobertura espacial, bem como a disponibilidade temporal de dados ([Paredes-Trejo e Barbosa, 2017](#)).

Segundo os autores, as medições de umidade do solo baseadas em medições in-situ são muito precisas, mas têm uma aplicação limitada devido a escala reduzida e a alta variabilidade dos solos. No entanto, é uma limitação que pode ser superada devido ao progresso no desenvolvimento de tecnologias de satélites e nos algoritmos de processamento para quantificar a umidade do solo de plataformas de micro-ondas ativas e passivas em grande escala.

De acordo com [Nascimento \(2002\)](#), os intervalos do infravermelho termal e micro-ondas pode apresentar melhor performance no monitoramento da umidade do solo, no entanto, o intervalo do visível ao infravermelho de ondas curtas, tem se mostrado mais operacional devido à vasta disponibilidade de imagens da superfície terrestre com diferentes resoluções espaciais. De modo geral, todos os intervalos espectrais, seja do visível ao infravermelho de ondas curtas,

termal ou micro-ondas, possuem limitações, não sendo utilizados ainda para prever frequentemente a umidade do solo, e que por isso a utilização desses produtos exige um conhecimento das relações existentes entre as grandezas medidas e as características do solo.

Diversos estudos e metodologias têm sido desenvolvidos, e de maneira geral, os sensores de micro-ondas têm sido os mais adequados para a detecção da umidade do solo pois se baseiam no contraste entre as propriedades dielétricas (capacidade de um material produzir energia elétrica) da água e do material do solo (Souza, 2019). De acordo com O'Neill *et al.* (2021), a porção de micro-ondas do espectro eletromagnético que inclui comprimentos de ondas de alguns centímetros a um metro, são mais promissoras para estimar a umidade do solo na superfície remotamente (Figura 2.8).

As baixas frequências de micro-ondas (comprimentos de ondas longas), seja na banda L ou de aproximadamente 1 GHz (20-30 cm), oferecem vantagens relacionadas a atmosfera, que é quase transparente frente a esses sensores, proporcionando melhor detecção em todos os tipos climáticos. Também é possível a transmissão de sinais do solo subjacente através de camadas de vegetação (até pelo menos 5kg/m^2 de conteúdo de água da vegetação). Outra vantagem, é que a medição é independente da iluminação solar, permitindo observações dia e noite (O'Neill *et al.*, 2021).

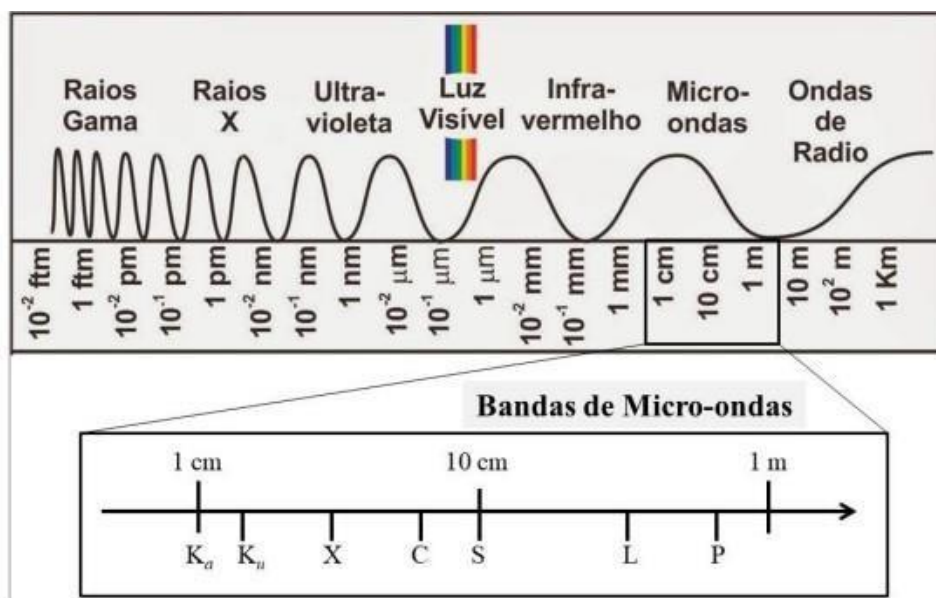


Figura 2.8: Espectro eletromagnético. Fonte: Souza (2019), adaptado do Portal Ponto Ciência, 2012).

Segundo Maske (2016), o espectro de micro-ondas compreendido entre as frequências de 0,3 a 30 GHz do espectro eletromagnético, tem sido muito utilizado no sensoriamento remoto

para produtos de superfície, dada a sua capacidade de penetração nas nuvens e independência da iluminação solar e da capacidade de penetração na vegetação mais profunda. De acordo com a autora, estudos realizados mostraram que na frequência de 1.5 GHz, a profundidade de penetração pode estar entre 10 cm e 1 m para o solo na condição de úmido a seco. Para esta mesma situação na frequência de 30 GHz, a variação seria de 1 mm a 1 cm.

Considera-se que comprimentos de ondas maiores são mais sensíveis a variações de umidade e temperatura em profundidade maior do solo, do que comprimentos de ondas menores. Em termos técnicos gerais, para realizar as medições de umidade do solo é levado em conta que a diferença do valor da constante dielétrica da água é diferente da constante do solo seco, tendo como resultado a variação da emissividade, que conseqüentemente, afeta a temperatura de brilho. É uma medida que sofre interferência de diversos fatores, mas principalmente da rugosidade do solo e da vegetação, e por isso são considerados no modelo de recuperação na estimativa de umidade do solo (Maske, 2016).

A umidade do solo pode ser obtida tanto por micro-ondas ativas quanto passivas (Souza, 2019). Os sensores ativos e passivos recebem tal denominação pela capacidade ou não do sistema sensor emitir energia própria para interagir com os alvos. O sensor passivo, como os radiômetros, mede a energia natural emitida da superfície terrestre na forma de temperatura de brilho (TB). Já o sensor ativo, como os radares, envia um feixe focalizado de radiação de micro-ondas em direção ao solo e captura o sinal retro espalhado da superfície da Terra (Karthikeyan *et al.*, 2017a). Centrando na diferença entre esses sensores, de acordo com Karthikeyan *et al.* (2017a), o solo úmido parece mais frio para os radiômetros e mais brilhante para o radar.

Segundo Jensen (2007), solos úmidos retro espalham mais energia de radar do que solos secos (dependendo da constante dielétrica complexa do material que compõe o solo). Deste modo, a quantidade de umidade no solo influencia na profundidade de penetração da energia eletromagnética incidente, e quanto maior for a umidade no solo, mais espalhada será a energia incidente pela superfície, produzindo forte sinal de retorno.

O sensoriamento remoto por micro-ondas ativas ganhou força na década de 1990 com o lançamento de três satélites que transportavam radares de abertura sintética: SAR – Synthetic Aperture Radar - Radar Satellite (RADARSAT), European Remote Sensing (ERS), e Japanese Earth Resources Satellite (JERS). Dados do tipo SAR possuem potencial para estimar umidade de solos devido à capacidade de penetração de pulsos eletromagnéticos de radar nos solos, no entanto, apesar desses produtos apresentarem alta resolução espacial na ordem de metros, a

resolução temporal é baixa e o sinal sofre interferências da rugosidade da superfície e da vegetação, que dificulta a precisão das recuperações de umidade de solo (Souza, 2019).

Já o sensoriamento remoto por micro-ondas passivas monitora a emissão térmica natural que emana da superfície da Terra, denominada de temperatura de brilho (TB) e por isso são usados com sucesso para estimativa de umidade do solo. Eles cobrem uma ampla faixa de frequências e permitem inferir informações sobre a textura, rugosidade da superfície, a profundidade óptica da vegetação e a profundidade da camada de amostra do solo, além de obter a umidade do solo. A variação na intensidade desta radiação depende das propriedades dielétricas e temperatura do alvo (O'Neill *et al.*, 2021).

As missões mais recentes de micro-ondas passivas são os satélites SMOS da Agência Espacial Europeia (ESA) e o SMAP da Agência Espacial Americana (NASA), que passaram a operar nos anos 2010 e 2015, respectivamente. Ambos os sensores operam na banda L e sofrem menos interferência da influência da vegetação e atmosfera em relação as bandas C e X e por isso, são ideais para recuperação da umidade do solo (Souza, 2019). Segundo Spatafora *et al.* (2020), várias pesquisas têm demonstrado que a banda L de micro-ondas é muito sensível à umidade de solo da superfície da terra (cerca de 5 cm).

De modo geral, embora as observações de micro-ondas sejam menos afetadas pela atmosfera e pela cobertura vegetal, que emite e retro espalha sinais de micro-ondas, elas ainda desempenham um papel significativo na atenuação dos sinais de umidade do solo em frequências mais altas, tornando difícil recuperar a umidade do solo em regiões densamente vegetadas. Além disso, a precipitação intensa contribui para o ruído, tornando as recuperações durante as condições de precipitação ativa menos confiáveis e a Interferência de Radiofrequência (RFI) pode levar a uma supersaturação do sinal de micro-ondas.

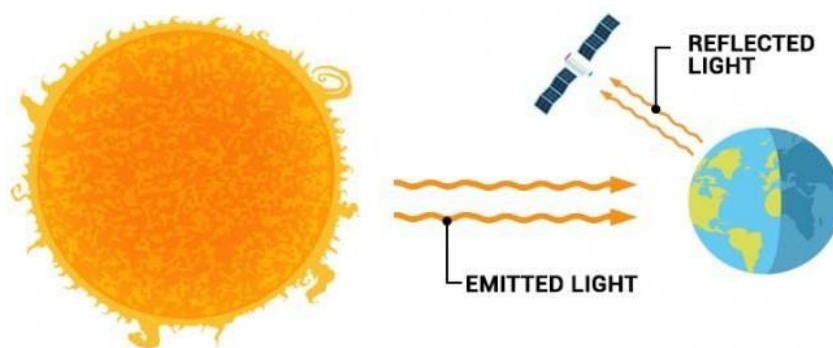


Figura 2.9: Diagrama de um sensor passivo. Fonte: NASA (2023).

2.4 Sensores Passivos e estimativa de umidade do solo

Os sensores passivos detectam a energia emitida ou refletida de um objeto e incluem diferentes tipos de radiômetros e espectrômetros. Os radiômetros medem quantitativamente a intensidade da radiação eletromagnética em bandas selecionadas e os espectrômetros são dispositivos projetados para detectar, medir e analisar o conteúdo espectral da radiação eletromagnética refletida (Figura 2.9). A maioria dos sistemas passivos usados em aplicações de sensoriamento remoto operam nas porções visível, infravermelha, infravermelha térmica e micro-ondas do espectro eletromagnético (NASA, 2023).

Como já analisado, os radiômetros de micro-ondas detectam a emissão térmica (na forma de temperatura de brilho) da superfície do solo que é proporcional à temperatura física do solo, e a constante de proporcionalidade é a emissividade de micro-ondas do solo, que é fortemente influenciada pelas variações de umidade do solo. A emissividade, segundo a lei de Kirchhoff (Kirchhoff, 1860), complementa a refletividade da superfície. À medida que o teor de umidade no solo aumenta, a condutividade dielétrica do solo diminui, resultando em uma redução da emissividade, levando a uma temperatura de brilho mais baixa (Karthikeyan *et al.*, 2017a).

De acordo com Karthikeyan *et al.* (2017a), um algoritmo de recuperação de umidade do solo normalmente tem duas fases: primeiro, usando um Modelo de Transferência Radiativa (RTM) para relacionar a temperatura de brilho e a constante dielétrica do solo; e segundo, vincular a constante dielétrica do solo com a umidade do solo usando modelos de “mistura dielétrica”. Esses algoritmos foram melhorados ao longo dos anos, além disso, têm-se concentrado esforços para relacionar a umidade do solo com a constante dielétrica do solo usando mecanismos semiempíricos e observações de campo (Karthikeyan *et al.*, 2017a).

A constante dielétrica do solo é um número complexo com a parte real (κ^0) descrevendo a propagação do sinal através do solo e a parte imaginária (κ'') caracterizando a perda de energia no solo e que nas baixas frequências (bandas L-, C-, X-), o efeito de κ é insignificante (Karthikeyan *et al.*, 2017a). Segundo Karthikeyan *et al.* (2017a), os algoritmos de recuperação de primeira geração foram desenvolvidos com base em canal único de polarização/frequência e ângulo de visão que recuperam apenas a umidade do solo com o objetivo de minimizar o erro entre as temperaturas de brilho observadas e modeladas na polarização horizontal ou vertical.

Com os avanços nas configurações de sensores, como os usados nas missões SMOS e SMAP, surge a oportunidade para observar temperaturas de brilho de dupla polarização

multiangular. A emissão de micro-ondas da Banda L é um desses algoritmos que está atualmente em uso para a missão SMOS e SMAP. Todos os algoritmos passivos de recuperação de micro-ondas são baseados na equação de transferência radiativa de ordem zero.

No caso do algoritmo utilizado no SMOS, devido ao complicado design em forma de Y do sensor, são empregados modelos separados para abordar os efeitos de florestas, lixo, areia seca e mar aberto. Devida essa complicação, a missão SMAP seguiu um design de sensor relativamente mais conservador (com esforço extra em questões de RFI) e um Algoritmo de Canal Único (SCA) “simples”, resultando em melhorias substanciais na precisão das recuperações de umidade do solo do SMAP.

2.5 Validação de produtos SMOS e SMAP

[Karthikeyan et al. \(2017b\)](#) se concentraram em avaliar os produtos de umidade do solo por micro-ondas de oito sensores passivos (dentre eles os sensores dos satélites SMOS e SMAP) de 1978 a 2018, de acordo com a disponibilidade dos dados existentes para a pesquisa. Testes estatísticos foram aplicados em todas as estações. Ao todo foram mais de 20 observações de satélite e in-situ em regiões dos EUA. Foi observado dois fatores importantes que influenciaram nos resultados: características do sensor e algoritmo de recuperação, e número de estações e o número total de observações usadas.

A correlação observada na validação temporal entre os valores in-situ e os valores estimados pelos satélites SMOS e SMAP (objeto de avaliação neste tópico) variou de 0.38 a 0.67 para o SMOS e de 0.62 a 0.77 para o SMAP, e a validação espacial resultou uma correlação de 0.68 a 0.83 para o SMOS e de 0.77 a 0.87 para o SMAP. No geral os produtos de ambos os satélites se correlacionaram bem entre si, no entanto, o SMAP apresentou melhor precisão. Os demais sensores avaliados apresentaram valores parecidos, porém com menores precisões.

[Xu e Frey \(2021\)](#) fizeram uma validação (5 anos de dados) em uma região úmida no estado americano de Michigan usando dados de umidade do solo in-situ para cinco conjuntos de dados de umidade do solo de satélite, incluindo o produto de dados de umidade do solo SMOS e SMAP. Todos os cinco conjuntos de produtos de umidade do solo dos satélites mostraram concordância razoável com as medições in-situ em termos do padrão temporal. Os valores de R para o SMAP variaram entre 0.4 e 0.8. O produto SMOS apresentou valor R de 0.3 a 0.6 sobre os locais com vegetação modesta, no entanto, de acordo com os autores, cerca de metade dos locais com vegetação densa sugeriram R muito baixo (< 0.3) ou mesmo negativo para o produto.

De modo geral, os autores observaram que a umidade superficial do solo detectada remotamente é menos precisa em áreas com vegetação densa por causa dos efeitos da atenuação da vegetação na emissão de micro-ondas do solo. Em termos de R médio, o SMAP apresentou um valor de 0.56 para o grupo de terras cultiváveis e florestas. Já o produto SMOS forneceu o menor resultado de R (0.4) para o grupo de terras agrícolas, e mais baixo (0.27) para o grupo de florestas. De forma geral todos os produtos tiveram melhor desempenho em áreas com vegetação menos densa do que nas áreas com vegetação mais densa.

Fan *et al.* (2022) usaram dados de umidade do solo do Global Land Data Assimilation System (GLDAS) como referência para análise comparativa, e uma análise de colocação tripla para validar os dados de quatro principais produtos de umidade do solo de sensoriamento remoto passivo por micro-ondas: SMOS e SMAP, Global Change Observation Mission–Water using the Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2) instrument, e Fengyun-3C (FY-3C) na China (série de 3 anos de dados). Foi determinado os efeitos da topografia, cobertura da terra, e fatores meteorológicos, para a precisão dos observados de umidade do solo. Os resultados mostraram que o SMAP teve o melhor desempenho geral e o AMSR2 o pior. Os valores de R ficaram em torno de 0.51 para o SMOS e FY-3C, e 0.76 para o SMAP, e de 0.44 para o AMSR2. Embora tanto o SMAP quanto o SMOS usem a banda L para gerar dados de umidade do solo, o instrumento SMAP é um radiômetro de abertura real, enquanto o SMOS usa um radiômetro de abertura sintética, assim, segundo os autores, a observação SMOS produz mais ruído interno.

De acordo com Fan *et al.* (2022) o valor médio da elevação do DEM (Modelo Digital de Elevação) afeta muito a precisão dos produtos de umidade do solo de sensoriamento remoto por micro-ondas. Os coeficientes de correlação dos quatro produtos foram maiores quando a elevação média do DEM foi alta. Avaliaram também que a precisão dos dados de umidade do solo de micro-ondas observados passivamente, é afetada por diferenças na cobertura da terra. Para terras agrícolas, florestas, pastagens e áreas urbanas, o SMAP foi mais estável e significativamente mais preciso do que o SMOS ou o AMSR2. O maior valor de R para SMOS foi para rocha e cascalho e o menor para floresta densa; o maior valor de R para SMAP foi para floresta densa e o menor valor foi para matagal e arbusto baixo. O melhor desempenho geral dos quatro tipos de superfície de produtos foi para solo exposto. Em geral, os resultados foram consistentes com a análise geral de que AMSR2 era mais úmido e os outros produtos mais secos do que os dados de GLDAS, de acordo com as observações.

Avaliando os fatores meteorológicos, os coeficientes de umidade do solo do SMOS, AMSR2 e FY-3C diminuíram com o aumento da temperatura média e a precisão do SMAP permaneceu inalterada, no entanto, os valores de correlação de todos os produtos diminuíram à medida que a temperatura máxima aumentou e vice-versa. As correlações SMOS e SMAP foram ligeiramente afetados pela precipitação. Áreas com grandes coeficientes de determinação eram geralmente regiões com baixas temperaturas médias ($-1,86$ - $-8,67^{\circ}\text{C}$), temperaturas máximas $\leq 34,81^{\circ}\text{C}$ e pouca precipitação (0,03 - 1,67 mm).

Wang *et al.* (2021) usaram estimativas de umidade do solo geradas pela fusão de um produto de umidade do solo modelo de superfície terrestre usando observações in-situ por meio de um método de rede neural de retropropagação, para avaliar quatro produtos de umidade do solo derivados dos satélites SMOS e SMAP: SMOS-L3, SMOS-IC, SMAP_L3_SM_P e SMAP_L3_SM_P_E sobre a altamente irrigada bacia do rio Huai na China. Considerando a área da bacia, o produto SMOS-L3 apresentou correlação de 0.40, enquanto o SMOS-IC de 0.33, já o produto SMAP_L3_SM_P teve correlação de 0.62 e o SMAP_L3_SM_P_E de 0.57. Observaram que os produtos SMOS e SMAP reproduzem com precisão os padrões temporais seco e úmido dentro das sub-bacias e que a transição temporal de úmido para seco durante a estação das cheias (maio a setembro) é mais abrupta para SMOS do que para as recuperações SMAP.

2.6 Estudos realizados com o SMOS e o SMAP no Brasil

Estudos desenvolvidos com base no uso dos produtos de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP no Brasil também têm apresentado bons resultados. Paredes-Trejo e Barbosa (2017) se basearam no Índice de Déficit Hídrico do Solo (SWDI) que foi calculado utilizando a umidade do solo SMOS L2, na região do Nordeste brasileiro. Os dados SWDI derivados de SMOS (SWDIS) foram avaliados em relação ao déficit hídrico atmosférico (AWD) calculado a partir de observações in-situ. As comparações foram feitas em escalas de sete dias e $0,25^{\circ}$, no período de junho de 2010 a dezembro de 2013. Constataram-se que o SWDIS tem um bom desempenho em termos de detecção de semanas de seca (habilidade = 0, $R = 0.652$), implicando que o SWDIS poderia ser usado para rastrear secas agrícolas. Além disso, observaram que o SWDIS apresenta baixo desempenho em locais localizados em regiões montanhosas afetadas por secas severas ($-0,10 \leq r \leq 0,10$). Notaram também que a cobertura vegetal, o regime climático e a textura do solo têm pouca influência no acoplamento AWD-SWDIS.

Os estudos de [Araújo *et al.* \(2018\)](#) tiveram como foco a validação de uma nova versão do produto SMOS desenvolvido pelo Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) e Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO). De acordo com os autores, uma das vantagens do SMOS-INRA-CESBIO (SMOS-IC) é que o produto é o mais independente possível dos dados auxiliares. A validação foi realizada em 7 estações localizadas em uma mesorregião semiárida do estado de Pernambuco, região Nordeste do Brasil, para o ano de 2016. Foram calculados a diferença quadrática média (RMSD), RMSD imparcial e o coeficiente de correlação de Pearson entre os dados SMOS-IC e medições in-situ, considerando apenas a órbita ascendente. Os resultados foram consistentes com os encontrados em diversos estudos, incluindo métricas de erro. O coeficiente de correlação (R) variou de 0.53 a 0.86 (média 0.68) e segundo os autores, o sensor foi capaz de responder adequadamente aos eventos de chuva.

De acordo com [Araújo *et al.* \(2018\)](#), os picos nos dados do SMOS-IC se tornam comuns quando há chuvas mais intensas, gerando uma assinatura de umidade do solo superior à registrada pelas estações in-situ, o que mostra a alta sensibilidade do sensor e sua rápida resposta ao aumento da umidade superficial do solo durante os períodos de chuva. Este mesmo padrão identificado em outros estudos ao redor do mundo. Os autores ressaltam que o SMOS-IC, é uma versão alternativa e melhorada do SMOSL3 operacional, portanto, muitos dos dados que estão fora da faixa de precisão do satélite, são filtrados automaticamente durante o reprocessamento. Complementam que testes preliminares realizados com o SMOSL3, mostram que este tende a apresentar picos maiores que o SMOS-IC. Esses picos são geralmente associados a altos valores de Índice de Qualidade de Dados (DQX) e Interferência de Radiofrequência (RFI), que são índices usados para avaliar a qualidade dos dados e representam a incerteza da recuperação.

[Ribeiro *et al.* \(2019\)](#) analisaram a distribuição espaço-temporal da umidade de solo em todo território nacional, utilizando como divisão os biomas, objetivando comparar ao mesmo tempo as variáveis de pluviometria, que influencia diretamente a umidade de solo, e o NDVI. Para isto, foram utilizadas imagens orbitais de umidade do solo do satélite SMAP, o NDVI do satélite MODIS e pluviometria dos satélites Global Precipitation Measurement – GPM. Considerou-se como recorte temporal o período de abril de 2015 a julho de 2016 para todo o território nacional.

Identificaram uma tendência que acompanha as características de cada bioma, sendo que onde há muita precipitação, tem-se alta umidade de solo, tanto na superfície, quanto na zona raiz, e conseqüentemente alto valor de NDVI, já que as plantas teriam disponibilidade de

água suficiente para fazer a fotossíntese. O bioma Amazônico apresentou NDVI mais constante ao longo do período estudado, fato que pode ser explicado pela sua densa estrutura florística. A densidade da vegetação evita que um maior fluxo de evapotranspiração ocorra e mantém o solo mais úmido, e conseqüentemente as plantas terão uma maior quantidade de água disponível para uso por mais tempo e, assim, estarão com a sua atividade fotossintética sempre alta.

Dentre os biomas estudados, o Pantanal é o mais parecido com a Amazônia, porém nota-se uma queda mais acentuada nos meses de julho a outubro, que são meses em que ocorre menor volume de precipitação. A distribuição da precipitação nos dois biomas é bem similar, contudo, o bioma Amazônia se diferencia por ter maior quantidade. A umidade do solo acompanha a pluviometria, as duas variáveis estão diretamente correlacionadas, e nos dois casos apresentados não há discrepâncias neste sentido. O bioma Mata Atlântica, apresentou maior correlação entre as variáveis analisadas. O NDVI teve um comportamento semelhante à umidade do solo, tanto na zona de raiz, quanto na superfície, que por sua vez acompanharam a distribuição da precipitação para o período analisado.

Já os biomas Cerrado e Caatinga apresentam características climáticas e físicas semelhantes. Os dois possuem um período de seca severa entre os meses de maio a outubro, sendo que na Caatinga esse período se estende um pouco mais (geralmente são nove meses de seca e apenas de 2 a 3 meses de precipitação). Nestes biomas nota-se uma particularidade em relação à umidade de solo. Nos biomas Amazônia, Pantanal e Mata Atlântica quase não há diferenças entre a umidade na superfície e na zona de raiz, já no Cerrado essa diferença é expressiva. Na Caatinga, a umidade na superfície é menor do que na zona de raiz, justamente pelo fato de haver pouca precipitação, além de solos rasos e pedregosos, o que dificulta o acúmulo de água na superfície, esses fatores na verdade aumentam a evaporação.

O NDVI para os dois biomas se mantém de acordo com a precipitação, valores baixos nas épocas de seca e, altos nas épocas de maior precipitação. Os valores mínimos de NDVI para o período analisado estão entre 0,4 e 0,3 para o Cerrado e Caatinga respectivamente. Em relação aos outros biomas que tem valores mínimos em torno de 0,6 podem ser considerados abaixo da média. Apesar da formação vegetal destes locais terem como característica a resistência e raízes profundas, isso mostra que nestas regiões há um déficit hídrico.

Segundo [Ribeiro et al. \(2019\)](#), o bioma Pampa apresentou um comportamento diferente em relação aos outros biomas. Nos outros biomas analisados, o NDVI variava conforme a precipitação e umidade do solo. No caso do bioma Pampa, enquanto a umidade do solo e a

precipitação aumentava, o NDVI diminuía. Tal relação foi devido o bioma Pampa possuir grandes áreas alagadas.

Os autores explicam que em locais onde a vegetação está coberta por água, o sensor de satélite que capta a energia eletromagnética refletida da superfície recebe um fraco sinal. Ou a energia é absorvida pela água totalmente e não retorna, ou retorna ao sensor de forma reduzida, o que faz com que os valores de NDVI sejam baixos nestas circunstâncias. Por outro lado, quando a umidade do solo está baixa e há pouca precipitação, os locais que foram alagados secam e a vegetação passa a fazer a fotossíntese de forma mais vigorosa e, essa energia é captada pelos sensores em sua totalidade.

Juca *et al.* (2019) analisaram o desempenho dos dados SMOS e SMAP em relação aos dados umidade do solo de campo em diferentes regiões de Pernambuco. A avaliação foi realizada pelo método pixel-estação e a qualidade dos produtos foi analisada a partir de quatro estatísticas: coeficiente de correlação de Pearson, índice de concordância de Willmott, BIAS e Desvio Quadrático Médio (RMSD). Os dados do SMAP apresentaram bom desempenho para as três estações, com coeficientes de correlação superiores a 0.79 e BIAS inferior a 0.027. O SMOS também apresentou elevada performance, com valores mínimos de correlação e índice de Willmott de 0.708 e 0.765, respectivamente, e RMSD de 0.03 a 0.071. Os produtos do ESA CCI SM apresentaram forte tendência de superestimação para duas estações, com BIAS e RMSD superiores a 0.1.

Os estudos de Souza (2019) consistiram em estimar a seca meteorológica e agrícola a partir de dados de umidade do solo do satélite SMOS e dos produtos do MODIS, abrangendo o período de 2010 a 2017, levando em consideração três regiões climáticas: Mata, Agreste e Sertão, no Pernambuco. A pesquisa foi dividida em três fases, sendo que na primeira consistiu na validação dos dados de umidade do solo do satélite SMOS com base em redes de observação in-situ. Os resultados encontrados apontaram que os dados de umidade do solo do satélite SMOS apresentaram a mesma tendência dos dados in situ e esse comportamento refletiu estatisticamente em valores significativos, no qual os melhores desempenhos foram observados nas regiões semiáridas.

Spatafora *et al.* (2020) analisaram a qualidade dos produtos de umidade do solo L3 (25 km) e L4 (1 km) gerados no Centro de Especialistas de Barcelona (BEC) em dois locais localizados em regiões semiáridas distintas, onde estão instaladas redes de medição: “Red de Estaciones de Medición de la Humedad del Suelo” (REMEDHUS), localizada na parte central da bacia do Douro (Espanha), e Centro Nacional de Monitoramento e Alerta Prévio de Desastres

Naturais (CEMADEN), no Nordeste do Brasil. O REMEDHUS tem sido usado como um site de calibração/validação para missões SMOS e SMAP. É uma rede densa cobrindo $35 \times 35 km^2$ e tem 22 estações. A rede CEMADEN fornece um banco de dados para o desenvolvimento de alertas precoces para desastres naturais que ocorrem no Brasil, como secas e enchentes. É uma rede esparsa cobrindo $1000 \times 1000 km^2$ com mais de 500 estações.

Os resultados dos estudos de [Spatafora et al. \(2020\)](#) mostraram boa correspondência entre os dados do SMOS L4 e os dados de umidade do solo in-situ para as redes REMEDHUS e CEMADEN. A média das correlações varia de 0.3 a 0.8 e dependeram principalmente da situação da estação, tipo de solo e cobertura da terra nas redes da Espanha e do Brasil. Para os dados médios de ambas as séries, o coeficiente de correlação é superior a 0.6. Os resultados mostram que o produto L4 está mais bem correlacionado do que o produto L3, embora os produtos L4 e L3 sejam bastante semelhantes. Isso indica que ambos os produtos estão prontos para seu uso operacional, com L4 proporcionando uma melhor representação do estado de umidade do solo em escalas mais finas.

2.7 Índices de vegetação e umidade do solo

As medições de umidade do solo a partir de sensores ativos e passivos não integram a profundidade de umidade do solo na zona raiz, que pode ser de dezenas de centímetros a metros, dependendo da vegetação. Os autores afirmam que compreender e quantificar a umidade do solo e as informações de detecção remota da vegetação em várias resoluções espaciais, torna possível monitorar a umidade do solo em grandes escalas, principalmente em áreas sujeitas à seca ([Liu et al., 2012](#)).

A zona raiz é dada como a região do solo penetrada pelas raízes da vegetação e varia com as características do clima, solo e vegetação. Segundo [Liu et al. \(2012\)](#), as raízes das plantas afetam direta ou indiretamente muitos sistemas hidrológicos, e seus diversos componentes e processos incluindo umidade do solo, água subterrânea, evaporação, transpiração, além de contribuir com a abertura de caminhos hidráulicos que conectam à superfície facilitando a penetração da água da chuva.

De acordo com [Santos \(2014\)](#) os índices de vegetação derivados de dados de sensores remotos podem ser indiretamente utilizados para obter informação sobre a umidade do solo de áreas agrícolas, pois em muitas regiões do mundo, a umidade no perfil do solo é o principal fator que controla o vigor das plantas.

Os índices de vegetação derivados de imagens de sensoriamento remoto óptico identificam variações na área foliar e biomassa, a exemplo do NDVI, de pigmentos, a exemplo do Índice de Resistência Atmosférica Visível – VARI do inglês Visible Atmospherically Resistant Index, e do teor de água no dossel, por exemplo o Índice de Água de Diferença Normalizada – NDWI, dentre outros (Liu *et al.*, 2012). Segundo os autores, os índices de vegetação capturam as respostas da vegetação às mudanças na umidade do solo, seja por meio de mudanças na estrutura do dossel (murcha ou queda das folhas) e fração da vegetação verde, seja por meio de medidas da saúde da planta e fotossíntese.

Os índices de vegetação quantificam a evolução da área foliar, sanidade e vigor da vegetação, que é influenciada, dentre outros fatores, pela atmosfera e conteúdo de água no solo (Liu *et al.*, 2012). A mudança temporal da vegetação pode ser capturada através do NDVI, derivado de medições de sensoriamento remoto óptico, o qual se baseia na assinatura espectral da vegetação na faixa do infravermelho próximo e na faixa do vermelha, associando com o status da vegetação e a fração da cobertura vegetal (Figura 2.10) (Schnur *et al.*, 2010).

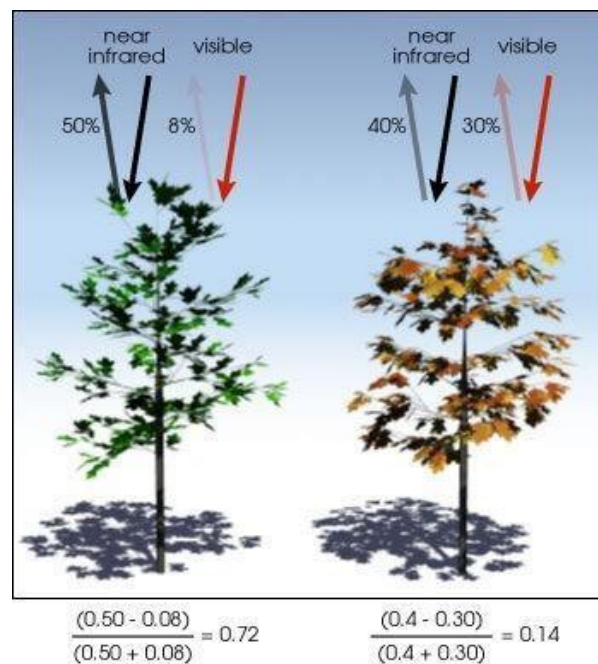


Figura 2.10: Figura ilustrativa do modelo do NDVI e a faixa infravermelha. Fonte: GIS Geography (2023).

Wang *et al.* (2007) apontam que em um curto período (horas), o NDVI pode diminuir devido ao aumento repentino da umidade de solo (chuva ou irrigação), uma vez que o aumento da umidade do solo da camada superior resultaria em uma diminuição da reflexão no infravermelho próximo em comparação com a reflexão vermelha da vegetação. Para períodos

de tempos mais longos espera-se que o NDVI aumente à medida que a umidade do solo aumenta ao longo da estação de crescimento.

Wang *et al.* (2007) em seus estudos analisaram a viabilidade do uso de técnicas de sensoriamento remoto óptico para mapear indiretamente a umidade do solo na zona raiz. Especificamente, avaliaram a covariação da umidade do solo na zona raiz com o NDVI do sensor MODIS em três locais (Novo México, Arizona e Texas) selecionados da Rede de Análise Climática do Solo (SCAN). Os três locais representam dois tipos de vegetação (arbusto e gramínea) e dois tipos de condições climáticas: semiárido (Novo México e Arizona) e úmido (Texas). Para correlação, foram utilizadas séries temporais brutas de umidade do solo e dessazonalizadas em cinco profundidades (5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm e 100 cm) e NDVI (composto de 8 dias em 250 m resolução) durante o período de fevereiro de 2000 a abril de 2004.

A regressão linear da série temporal dessazonalizada e da série temporal bruta foi usada para estimar a umidade do solo na zona raiz. Os resultados mostraram que a série temporal dessazonalizada resulta em correlação consistente e significativa (0,46–0,55) entre o NDVI e a umidade do solo na zona da raiz nos três locais. De acordo com a análise dos autores, a vegetação (NDVI) no local úmido precisa de mais tempo (10 dias) para responder à mudança de umidade do solo do que nos locais semi-áridos (5 dias ou menos). Também avaliaram que a série temporal da umidade do solo na zona raiz estimada por um modelo de regressão linear baseado em séries temporais dessazonalizadas é responsável por 42–71% das variações observadas de umidade do solo para os três locais.

Schnur *et al.* (2010) investigaram o potencial do uso do NDVI e o Índice de Vegetação Aprimorado (EVI) para estimar a umidade do solo da zona radicular baseando em medições in-situ e em locais distantes sob o mesmo cenário climático. Os dados in-situ foram obtidos de sites da Rede de Análise Climática do Solo (SCAN) perto da área de fronteira Texas-Novos México e os produtos NDVI e EVI do sensor MODIS.

Os resultados mostraram que os valores de umidade do solo na mesma profundidade entre locais distantes de até 150 km foram altamente correlacionados ($R = 0.53$ a 0.85) e que o NDVI e o EVI apresentam correlações altas para o mesmo local ($R = 0.87$ a 0.91). A correlação baseada em séries temporais brutas de NDVI e umidade do solo foi, em geral, maior do que a baseada em séries temporais dessazonalizadas em todas as profundidades. Os autores analisaram que a correlação atinge o valor máximo quando o índice de vegetação (IV) está em defasagem em 5 a 10 dias da umidade do solo. Para o NDVI houve uma correlação ligeiramente

maior com a umidade do solo do que para o EVI usando a série temporal dessazonalizada. Verificou-se que séries temporais dessazonalizadas de NDVI e umidade do solo estão correlacionadas nos locais de medições ($R = 0.33$ a 0.77), mas não nos locais onde a umidade do solo se apresenta muito baixa.

Foi aplicado a análise de regressão usando séries temporais dessazonalizadas de umidade do solo e séries temporais dessazonalizadas NDVI com defasagem de 5 dias. Os resultados dos modelos de regressão desenvolvidos e aplicados a um local distante mostraram que é possível estimar a umidade do solo em locais com características climáticas semelhantes, respondendo por 50-88% da variação observada na umidade do solo.

[Liu et al. \(2012\)](#) analisaram as relações entre a umidade do solo disponível para as plantas e índices de refletância e vegetação (VIs) derivados de dados AVIRIS e MODIS em áreas de pastagem na Califórnia. Foram observadas fortes correlações entre a umidade do solo e as diferentes formas de refletância nas bandas de red-edge, infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas. Tanto os índices de verdura como os que avaliam a água do dossel foram linearmente relacionados com a umidade do solo durante a estação de crescimento, a estação chuvosa e a estação seca. O uso da umidade do solo disponível para a planta, que é dado pela diferença entre a umidade do solo medida e o ponto de murcha, melhora a relação uma vez que reduz o efeito da propriedade do solo. Os resultados apontaram que a diferença de sensores teve pouco impacto nas correlações em pastagens, mas os parâmetros de relações foram influenciados pela resolução espacial dos sensores.

[Santos \(2014\)](#) verificou a relação entre umidade no perfil do solo (até 100 cm de profundidade) e o vigor vegetativo da planta, medido pelo Índice de Vegetação EVI-2, identificando o tempo de atraso de resposta do vigor da planta para a umidade do solo, em diferentes profundidades do perfil, propondo uma equação linear para a estimativa da umidade do solo pelo EVI-2, testando a hipótese de que é possível identificar, com auxílio do EVI-2, qual profundidade do solo pode ser considerada como profundidade efetiva de extração de água pelas plantas.

Os dados foram coletados em uma área de café, em São Roque de Minas, Bacia do Alto São Francisco, Minas Gerais, Brasil. A umidade do solo foi obtida por meio de uma sonda dotada de multissensores de capacitância (MCP), no período de março a dezembro de 2010, e o vigor vegetativo do cafeeiro foi medido pelo EVI-2. Foi verificado uma correlação efetiva entre o vigor vegetativo das plantas de café, com a umidade do solo na zona radicular. [Santos \(2014\)](#) observou que existe um tempo de atraso de resposta do vigor do cafeeiro com a umidade

do solo, e esse tempo varia de acordo com a profundidade e o conteúdo de água no perfil do solo.

2.8 Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica

No Brasil são considerados seis tipos de biomas a saber: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampas e Pantanal. Como neste estudo são analisados apenas os biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, este tópico consiste, portanto, em avaliar apenas as características fundamentais desses três biomas.

De acordo com [Ribeiro e Walter \(1998\)](#), dentro de uma fitofisionomia predominante que constitui um determinado tipo de bioma, existem outras fitofisionomias, cuja ocorrência se associa a eventos temporais e variações locais, como aspectos físicos e químicos do solo, geomorfologia e topografia. O termo "bioma", amplamente utilizado, pode ser considerado no sentido amplo como uma área do espaço geográfico, de grande dimensão, que tem por características um macro clima definido, de uma determinada fitofisionomia ou formação vegetal predominante, com fauna e outros organismos vivos associados, e de condições ambientais (altitude e solo) semelhantes ([Coutinho, 2006](#)).

O Cerrado está localizado majoritariamente na região do Planalto Central e trata-se de um complexo vegetacional que possui relações ecológicas e fisionômicas com outras Savanas da América tropical e de continentes como a África, Sudeste da Ásia e Austrália. De acordo com a [Embrapa \(2023\)](#), as formações florestais do Cerrado englobam os tipos de vegetação com predominância de espécies arbóreas, com formação de dossel descontínuo. Fazem parte, a Mata Ciliar e a Mata de Galeria, que são associadas a cursos de água e podem ocorrer em terrenos bem drenados ou mal drenados, e a Mata Seca e o Cerradão, que ocorrem em interflúvios em terrenos bem drenados, porém sem associação com cursos de água.

A vegetação do tipo arbustiva no Cerrado, fazem parte das formações savânicas nas categorias Cerrado Restrito, Parque de Cerrado, Palmeiral e a vereda, podendo considerar o Campo Sujo, parte das formações campestres. No geral, as características principais consistem em presença de extratos arbóreos descontínuos em diferentes densidades e extrato arbustivo-herbáceo definidos. Já a vegetação do tipo herbácea no Cerrado são formações campestres nas categorias de Campo Limpo e Campo Rupestre (Figura 2.11)

O bioma Caatinga localizado na região semiárida, apresenta terrenos cristalinos, praticamente impermeáveis e terrenos sedimentares. Os solos em sua maioria são poucos desenvolvidos e pedregosos, com fraca capacidade de retenção de água ([Alves, 2007](#)). De

acordo com a [Embrapa \(2023\)](#), a cobertura vegetal da Caatinga é composta por formações xerófilas e caducifólias diversificada por razões climáticas, edáficas, topográficas e antrópicas, e que de acordo com [Alves \(2007\)](#), reflete as inter-relações entre esses fatores o que dificulta uma classificação. Na Caatinga a altura da formação permite a separação em três categorias: floresta seca, caatingas arbustivas e estepes. As espécies caducifólias, arbóreas e arbustivas predominam na formação e constituem os estratos lenhosos. Já as espécies xerófilas mais adaptadas a seca, podem apresentar grande porte, mas não são encontradas em todo domínio da Caatinga ([Alves, 2007](#)).

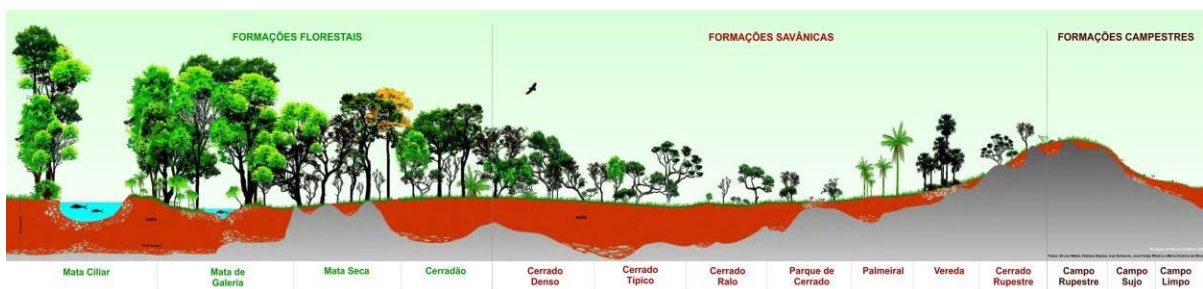


Figura 2.11: Fitofisionomias do Cerrado. Fonte: [Embrapa \(2023\)](#).

De acordo com [Alves \(2007\)](#), todas as espécies da caatinga dispõem de meios para enfrentar a estação seca, seja por modificações do ritmo biológico seja por mudanças no metabolismo da água: espinescência, acumulação da água nos tecidos e nas raízes, esclerofilia e emurchecimento das folhas, redução do tamanho das folhas e dos folíolos, sem atingir uma verdadeira microfilia que caracteriza muitas espécies de outras regiões semiáridas do mundo tropical. Segundo o autor, a maioria das espécies lenhosas na Caatinga é muito mais condicionada pela existência de um período de déficit hídrico longo do que pelos totais pluviométricos.

As espécies herbáceas na Caatinga são mais impactadas devido ao super-pastoreio em função de atividades pecuaristas na região, principalmente depois dos primeiros eventos de chuvas. Se desenvolvem melhor em solos mais arenosos e mais profundos, com estrato arbóreo mais aberto, com isso sua densidade e altura é bem diversificada. Já as formações florestais podem ser agrupadas em várias categorias podendo estar ligadas à existência de um lençol freático próximo dos solos mais ou menos permanente, a exemplo das matas ciliares, ou então ligadas a condições climáticas locais mais úmidas, com presença de sub-bosques herbáceos ou subarbustivo, ocorrendo até uma espécie de Caatinga "brejada" ([Alves, 2007](#)).

Em função de suas características climáticas, edáficas, topográficas e antrópicas, e a dificuldade na caracterização e espacialização, o termo "as caatingas", talvez seja mais apropriado, dado que uma mesma espécie florestal, arbustiva ou herbácea pode ser encontrada com altura e densidade diferentes a depender do lugar que se encontra. Nesse sentido, [Alves \(2007\)](#) conclui que as "caatingas" caracterizam-se por um predomínio de espécies lenhosas coexistindo com espécies herbáceas e gramíneas.

As espécies lenhosas chamam a atenção por suas formas biológicas e pela posição dominante na estrutura da formação. Elas podem se apresentar sob a forma de árvores, de arvoretas, de arbustos e de subarbustos. Os arbustos e arvoretas não apresentam fustes bem desenvolvidos e são ramificados a partir do nível do solo. Quanto às espécies herbáceas, algumas possuem ramos eretos e mais ou menos lenhificados. No conjunto, as caatingas apresentam-se normalmente com porte inferior a 7 metros, embora alguns tipos possam ultrapassar esta dimensão ([Alves, 2007](#)).

O bioma Mata Atlântica se estende pelas áreas mais povoadas do país, onde historicamente sofreu grande pressão antrópica, e como resultado apresenta um elevado grau de fragmentação de paisagem ([MMA, 2015](#)). De acordo com o [MMA \(2015\)](#), os remanescentes de vegetação nativa estão reduzidos a cerca de 22% de sua cobertura original, em diferentes estágios de regeneração, e apenas 7% desses remanescentes se encontram em bom estado de conservação.

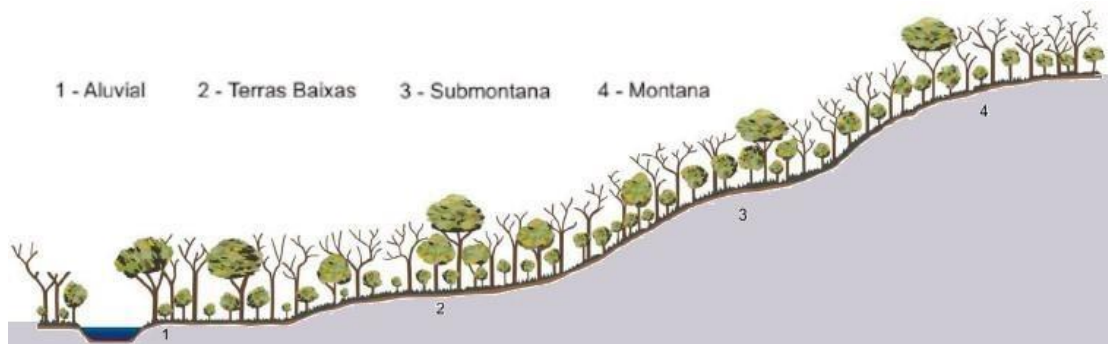
A fragmentação do bioma Mata Atlântica inclui as formações florestais e ecossistemas associados inseridos no domínio Mata Atlântica, com as respectivas delimitações estabelecidas pelo mapa de vegetação do Brasil do IBGE de 2004: Floresta Ombrófila Densa Atlântica, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual, manguezais, restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encraves florestais do Nordeste. É comum na análise desse bioma, os termos Mata primária e Mata secundária, sendo o primeiro termo associado a mata original (primitiva), enquanto o segundo se associa a uma espécie de "capoeira", mata mais aberta, com árvores mais baixas e finas que se encontram em vários estágios de evolução ([Pereira, 2009](#)).

De acordo com a classificação do IBGE, as áreas florestadas (dos três biomas considerados neste estudo) em sua maioria são denominadas como Savana Parque (para herbáceas) e Savanas Estépica (arbustivas). Para o Cerrado e a Caatinga, as áreas de florestas são do tipo Savana Arborizada e Floresta Estacional, enquanto para a Mata Atlântica, a

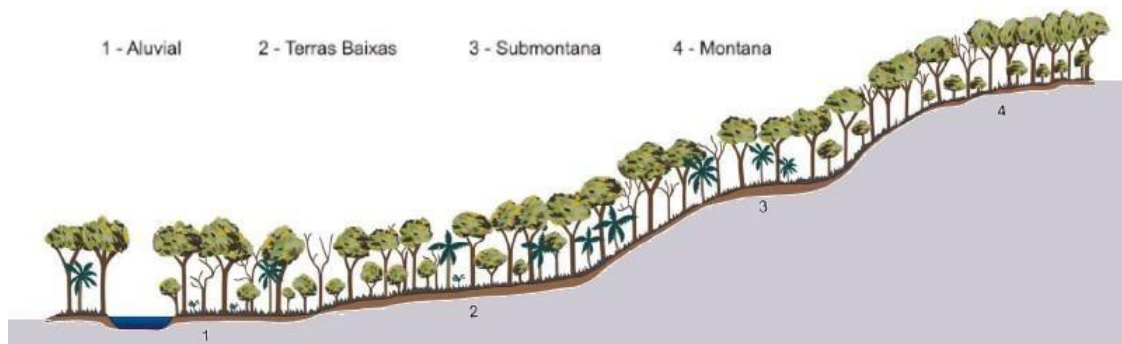
classificação se dá por floresta Semidecidual e Ombrólia Densa. As Figuras 2.12a, 2.12b, 2.12c, 2.12d e 2.12e ilustram essas formações.

As Savanas caracterizam-se pela dominância compartilhada das sinúsias arbórea e herbácea. A sinússia arbórea apresenta árvores de porte médio ou baixo (de 3 a 10 m), em geral espaçadas e com copas amplas, de esgalhamento baixo. A sinússia herbácea é praticamente contínua, formando um tapete entre as árvores e arbustos. O termo "Parque" é sinônimo de "savana arborizada". Foi adotado para designar uma fisionomia dos subgrupos de formações campestres brasileiras, sejam naturais ou antrópicos. Sua fisionomia é caracterizada pela presença de árvores baixas, espaçadas (isoladas), em meio a um estrato herbáceo contínuo.

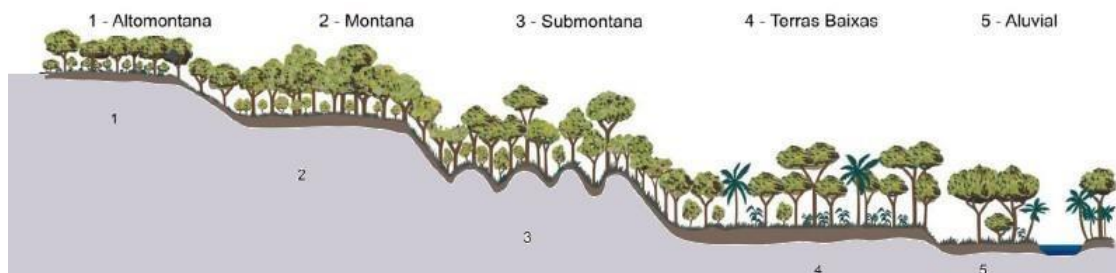
A Savana-Estépica apresenta fisionomia tropical na qual árvores, arbustos e ervas estão presentes de forma relevante, sem uma clara dominância fisionômica das árvores. Esta fisionomia foi extrapolada como sinônimo universalizado do termo indígena tupi guarani “Caatinga” e caracteriza os tipos de vegetação das áreas áridas nordestinas e inter-planálticas arrasadas (Sertão), principalmente (IBGE, 2012).



(a) Floresta Estacional Decidual



(b) Floresta Estacional Semidecidual



(c) Floresta Ombrólia Densa



(d) Savana (Cerrado)



(e) Savana-Estépica (Caatinga)

Figura 2.12: Perfil esquemático de cinco tipos de vegetação. Fonte: IBGE.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para correlacionar o índice da vegetação com a umidade do solo, foram adquiridos dados de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP, e dados de umidade do solo de medições de campo de dois pontos (para validação, Figura 3.1). Os dados do índice de vegetação (foi usado o NDVI) são do sensor MODIS. Para avaliar a variação da umidade do solo em cada um dos pontos, foram adquiridos também dados de precipitação do produto diário GPM e de evapotranspiração do modelo FLDAS, ambos com $0,1 \times 0,1$ graus de resolução ($\approx 11 \times 11 \text{ km}$), convertidos em médias mensais. Esses dados são descritos abaixo.



Figura 3.1: Localização das estações in-situ com dados de umidade do solo da Rede COSMOS, do Parque Estadual de Passununga – Santa Rita de Passa Quatro, SP e CPTEC/INPE – Cachoeira Paulista, SP.

3.1 Dados SMOS

A missão SMOS marcou o primeiro uso do radiômetro de interferometria passivo 2-D de dupla polarização de banda L (1,4 GHz). A medição de radiações de micro-ondas de comprimento de onda longo requer uma antena maior, que é obtida com um novo design em forma de 'Y' incorporado com 69 antenas menores (chamadas LICEFs), cada uma medindo as emissões da superfície da Terra na banda L. O SMOS é um satélite de órbita polar sincronizado

com o sol e alcança cobertura global a cada três dias. A meta do projeto é recuperar a umidade do solo com $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ de precisão. Outra característica exclusiva do SMOS reside em sua capacidade de medir temperaturas de brilho em vários ângulos de incidência na faixa de 0 a 50 graus (Karthikeyan *et al.*, 2017b).

Os produtos da superfície terrestre obtidos a partir do satélite SMOS (Figura 3.2) são gerados em diferentes níveis. Os dados de nível 0 são dados brutos. Os dados de nível 1A são de visibilidades calibrada, obtidas a partir da correlação entre os sinais medidos pelos receptores de antena antes de aplicar a reconstrução da imagem em polarização total (segmentos baseados no tempo pólo a pólo). A temperatura de brilho de nível 1B é a saída da reconstrução da imagem, que consiste nos componentes de Fourier das temperaturas de brilho na polarização da antena (Spatafora *et al.*, 2020).



Figura 3.2: O satélite SMOS em órbita.

As temperaturas de brilho de nível 1C são temperaturas de brilho obtidas no topo da atmosfera a partir de medições em ângulos de incidência múltipla do mesmo ponto geolocalizadas para um sistema em grade igual. Os conjuntos de dados são fornecidos para pixels terrestres e marítimos. O nível 1C é um produto baseado na média das temperaturas de brilho, considerando um ângulo de incidência de $42,5^\circ$ (Spatafora *et al.*, 2020).

Para este estudo foram utilizados dados de umidade do solo SMOS fornecido pelo Barcelona Expert Center – BEC, que é um laboratório de suporte da ESA dedicado ao

desenvolvimento e testes de novos algoritmos para melhorar os produtos de base SMOS Nível 1 (L1) e nível do oceano (L2), contribuindo também para a melhoria dos produtos L2 terrestres. Atualmente, a BEC tem distribuído produtos de umidade do solo da superfície em Nível Global 3 (L3) - versão 3.0 e em Nível Regional 4 (L4) – versão 5.0. Esses produtos são produzidos e fornecidos no formato netCDF-4. Os produtos utilizados neste estudo foram os mapas globais de umidade do solo L3 na grade EASE-2 de 25 km, obtidos pela média ponderada por Data Quality Index - DQX das medições ESA L2 de todas as órbitas SMOS dentro de um determinado período, como um dia, três dias, nove dias, um mês ou um ano, cuja filtragem descarta valores de umidade do solo não confiáveis.

Para a filtragem, os pontos de grade com o sinalizador “sem produto” são descartados. Esse sinalizador indica que a recuperação falhou devido aos dados geofísicos recuperados não serem de qualidade aceitável ou outros fatores. Pontos de grade com o sinalizador “probabilidade de interferência de radiofrequência (RFI - Radio Frequency Interferences)” para a polarização horizontal ou vertical definido como altos, são descartados. Pontos da grade com o sinalizador “fora de alcance” são descartados, pois indica que os dados geofísicos recuperados estão fora do intervalo estendido. E por fim, os pontos de grade com valores de DQX maiores que $0.07 \text{ m}^3/\text{m}^3$ são descartados ([Barcelona Expert Center, 2020](#)).

3.2 Dados SMAP

A missão Soil Moisture Active Passive (SMAP, Figura 3.3) da NASA teve como lançamento um satélite com um radar e um radiômetro de banda L para medições simultâneas e coincidentes integradas como um único sistema de observação. Na banda L, a emissão de micro-ondas (temperatura de brilho) medida pelo radiômetro emana principalmente do topo 5 cm e é claramente sensível à umidade do solo em regiões com teores de água da vegetação de até $\approx 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ em média sobre a pegada de resolução do radiômetro de $\approx 40 \text{ km}$ ([Jet Propulsion Laboratory, 2022](#)). O instrumento é equipado com uma antena refletora de malha de varredura cônica giratória de 6 m girando em uma órbita quase polar sincronizada com o sol a uma altitude de 685 km. A precisão do alvo da missão SMAP é de $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ([Karthikeyan et al., 2017b](#)).

No entanto, o instrumento de radar (parte ativa) deixou de operar no início de 2015 devido uma falha no fornecimento de energia do radar, chegando a coletar somente cerca de 3 meses de dados científicos com o sensor ativo. A fase principal da missão foi concluída em 2018, e desde então, o SMAP está em fase de operação estendida.

Os produtos do SMAP são disponibilizados publicamente por meio de dois “data centers” designados pela NASA, Alaska Satellite Facility (ASF) e National Snow and Ice Data Center (NSIDC). A ASF é especializada em dados SAR e a NSIDC é especializada em ciência criosférica e dados de micro-ondas terrestres. No total, a missão SMAP gerou 24 produtos de dados representando quatro níveis de processamento.

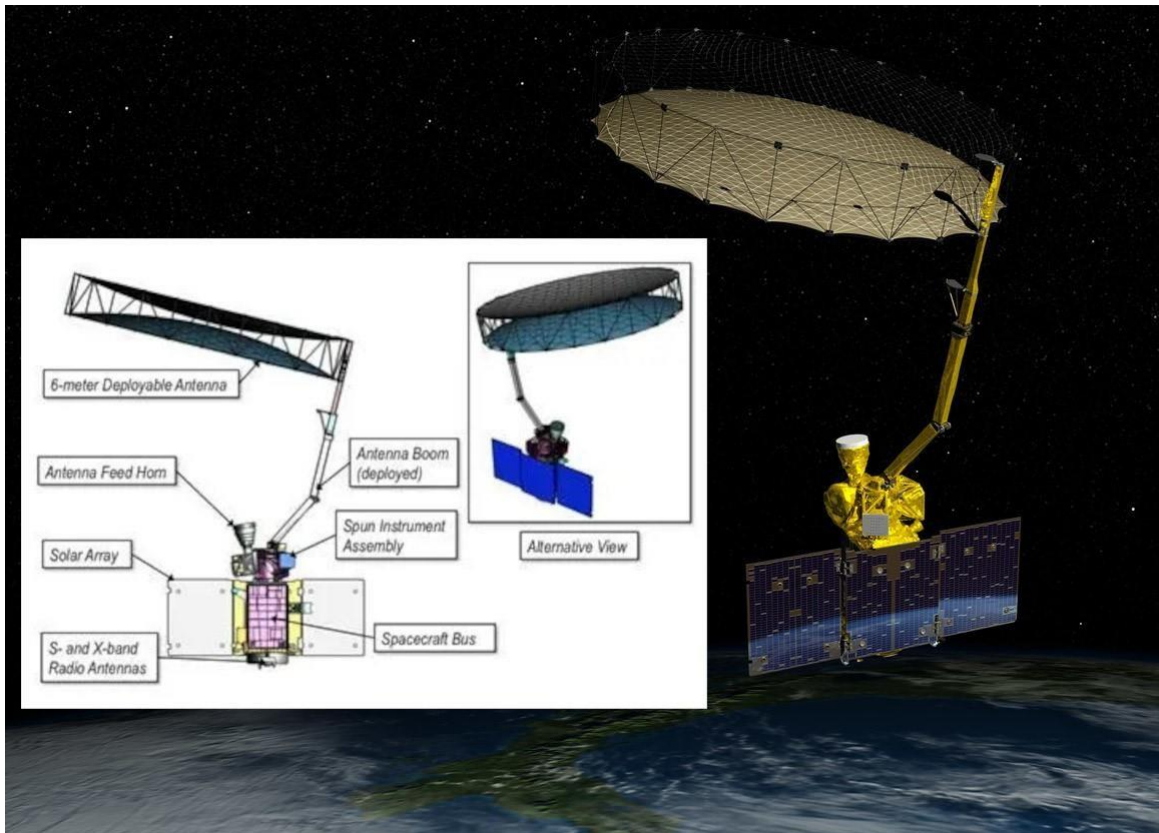


Figura 3.3: O satélite SMAP em órbita e sua configuração. Fonte: NASA.

Os produtos de Nível 1 contém medições de instrumentos brutos ou calibrados e geolocalizados do radar e radiômetro. Todos os produtos têm uma resolução temporal de 49 minutos, o tempo necessário para o satélite SMAP completar meia órbita da Terra. Os produtos de Nível 2 contém recuperações de umidade do solo derivadas de produtos de Nível 1 e arquivos auxiliares. Os produtos de Nível 3 são compostos diários da umidade do solo de Nível 2 e dados do estado de congelamento/descongelamento. Os produtos Nível 4 fornecem umidade do solo na zona da raiz derivada do modelo e troca de ecossistema de rede de carbono.

Para este estudo foi utilizado o produto de umidade do solo de superfície Nível 3 *L3_SM_P_E* (L3: Nível-3; SM: Umidade do Solo; P: Passivo; E: Aprimorado). Este produto é um composto diário de umidade do solo SMAP Nível-2 (L2) que é derivado de temperaturas

de brilho interpoladas de SMAP Nível-1C (L1C). A principal saída deste conjunto de dados é a umidade da superfície do solo (representando aproximadamente os 5 cm superiores da coluna do solo em média, dada em m^3/m^3) apresentada na Equal-Area Scalable Earth Grid de 9 km, Versão 2.0 (EASE-Grid 2.0) em uma projeção cilíndrica global. Os campos de dados em grades globais e polares são organizados em dados HDF5 separados em *Soil_Moisture_Retrieval_Data* (AM/PM) e *Soil_Moisture_Retrieval_Data_Polar*, respectivamente.

Os grupos AM e PM contêm dados de umidade do solo, dados auxiliares e sinalizadores de avaliação de qualidade. Os AM são recuperados em cada meia-órbita descendente da passagem do satélite (o satélite se move de Norte para Sul, e 6:00 é o LST Local Solar Time, no Equador). Os PM recuperam dados em cada passagem de meia órbita ascendente (o satélite se move de Sul para Norte, e 18:00 é o LST - no Equador).

O SMAP foi projetado para medir a umidade do solo, a cada 2-3 dias. A cobertura da rede global abrange de 180°W a 180°E e de aproximadamente 85.044°N e 85.044°S. A resolução espacial nativa da pegada do radiômetro é de aproximadamente 36 km. Os dados são então interpolados para uma resolução de grade de 9 km.

De acordo com a descrição de [O'Neill et al. \(2021\)](#), o RFI é a maior fonte de erros, principalmente de radares de vigilância terrestre, podendo contaminar radares e medições de radiômetro em frequências de banda L. O radiômetro SMAP implementa uma combinação de diversidade de tempo e frequência, detecção de curtose e uso de limites para detectar e sempre que possível mitigar o RFI. Os dados do radiômetro de nível 2/3 também podem conter erros de bits causados por ruído nos links de comunicação e dos dispositivos de armazenamento de memória.

3.3 Dados de umidade do solo de campo

Os dados de umidade do solo in-situ das estações utilizadas para testes de validação são encontrados no site ISMN - International Soil Moisture Network. Trata-se de uma cooperação internacional para estabelecer e manter dados globais de código aberto para fornecer dados de umidade do solo in-situ. Esse banco de dados é essencial para validar e melhorar os produtos globais de umidade do solo por satélite, bem como modelos de superfície terrestre, do clima ou hidrológicos. Os dados de umidade do solo de campo utilizados neste estudo fazem parte da Rede COSMOS (Cosmic-ray Soil Moisture Observing System), uma organização da Universidade do Arizona – EUA.

Há duas estações no Brasil em parceria com a Rede COSMOS com série temporal diária de dados de umidade do solo: Estação CPTEC/INPE (101) no município de Cachoeira Paulista - SP (longitude: -44.99° ; e latitude: -22.6798°), com dados disponíveis de 29/05/2014 a 29/03/2020, em profundidades de solo de 0 a 27 cm; e Estação Pé-de-Gigante (044) no município de Santa Rita de Passa Quatro - SP, localizada no Parque Estadual de Vassununga (longitude: -47.6325° ; e latitude: -21.6176°), com dados disponíveis de 02/08/2011 até 29/03/2020, em profundidades de solo de 0 a 33 cm.

Os dados gerados pelo COSMOS estão disponíveis em três níveis diferentes. Os dados de nível 1 são dados brutos das sondas. Os dados de nível 2 são controlados pela qualidade e corrigidos para efeitos locais. E os dados de nível 3 estimam a umidade do solo a partir de dados limpos e corrigidos. A umidade do solo é dada por % volumétrica e é medida através de sondas de raios cósmicos (Zreda *et al.*, 2008; 2012).

3.4 Sensor MODIS e NDVI

O instrumento MODIS (Espectroradiômetro de Imagem de Resolução Moderada) está operando nos satélites Terra e Aqua. Tem uma largura de faixa de visualização de 2.330 km e vê toda a superfície da Terra a cada um ou dois dias. Seus detectores medem 36 bandas espectrais entre 0,405 e 14,385 μm (Tabela 3.1) e adquire dados em três resoluções espaciais - 250 m, 500 m e 1.000 m.

As primeiras 19 bandas estão posicionadas na região do espectro eletromagnético situado entre 405 μm e 2.155 μm , de forma que as bandas 1-7 estão direcionadas para as aplicações terrestres; as bandas 8-16 para as observações oceânicas e as bandas 17-19 para as medições atmosféricas. As bandas 20-36, com exceção da banda 26 (1.360-1.390 μm), cobrem a porção termal do espectro eletromagnético (3660 μm a 14.385 μm) e podem ser utilizadas por diferentes campos das ciências naturais (Latorre *et al.*, 2022).

Os muitos produtos de dados derivados de observações MODIS descrevem características da terra, oceanos e atmosfera que podem ser usadas para estudos de processos e tendências em escalas locais a globais. O NDVI do sensor MODIS foi calculado a partir da razão normalizada entre as bandas do vermelho (1) e do infravermelho próximo (2).

Tabela 3.1: Especificação das bandas do sensor MODIS.

Faixas Refletivas			Bandas Termiais		
Banda	Largura de banda (μm)	Resolução (m)	Banda	Largura de banda (μm)	Resolução (m)
1	0,620-0,670	250	20	3.660-3.840	1000
2	0,841-0,876	250	21	3.929-3.989	1000
3	0,459-0,479	500	22	3.929-3.989	1000
4	0,545-0,565	500	23	4.020-4.080	1000
5	1.230-1.250	500	24	4.433-4.498	1000
6	1.628-1.652	500	25	4.482-4.549	1000
7	2.105-2.155	500	26	1.360-1.390	1000
8	0,405-0,420	1000	27	6.538-6.895	1000
9	0,438-0,448	1000	28	7.175-7.475	1000
10	0,483-0,493	1000	29	8.400-8.700	1000
11	0,526-0,536	1000	30	9.580-9.880	1000
12	0,546-0,556	1000	31	10.780-11.280	1000
13	0,662-0,672	1000	32	11.770-12.270	1000
14	0,673-0,683	1000	33	13.185-13.485	1000
15	0,743-0,753	1000	34	13.485-13.758	1000
16	0,862-0,877	1000	35	13.785-14.085	1000
17	0,890-0,920	1000	36	14.085-14.385	1000
18	0,931-0,941	1000			
19	0,915-0,965	1000			

3.5 Dados de Precipitação - GPM

A média mensal da precipitação usada neste estudo foi extraída do conjunto de dados dos satélites GPM (Global Precipitation Measurement) Nível 3 IMERG *Final* Diário 10 x 10 km, na versão 06 (GPM_3IMERGDF) derivado do GPM_3IMERGHH de meia hora, expressa em milímetros. O resultado derivado representa a estimativa final da precipitação diária acumulada. O conjunto de dados é produzido no Data and Information Services Center (DISC) Goddard Earth Sciences (GES) da NASA, simplesmente somando as recuperações de precipitação válidas para o dia em GPM_3IMERGHH e dando o resultado em (mm).

No algoritmo IMERG original, as estimativas de precipitação dos vários sensores de microondas passivos (PMW) de satélite relevantes para a precipitação que compõem a constelação GPM são calculadas usando a versão 2017 do Goddard Profiling Algorithm (GPROF2017), depois gradeadas, intercalibradas para o GPM Combined Ku Radar-Radiometer Algorithm (CORRA) e mesclados em campos de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (aproximadamente 10x10 km) a cada meia hora (Huffman *et al.*, 2019).

A missão GPM é uma rede internacional de satélites que fornece observações globais de última geração de chuva e neve. Com base no sucesso da Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), o projeto GPM implantou um satélite “Core Observatory” que transporta um sistema avançado de radar / radiômetro para medir a precipitação do espaço e servir como um padrão de referência para unificar as medições de precipitação. O TRMM se concentrou principalmente em chuvas fortes a moderadas nos oceanos tropicais e subtropicais e um avanço importante do GPM em relação ao TRMM é a capacidade estendida de medir chuva leve ($\leq 0.5\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$). Mais detalhes podem ser encontrados em [GPM - NASA](#).

Por meio de medições aprimoradas de precipitação, a missão GPM está ajudando a avançar na compreensão dos ciclos de água e energia da Terra globalmente, melhorando a previsão de eventos extremos que causam riscos e desastres naturais, visando ampliar os recursos atuais no uso de informações precisas e oportunas de precipitação para beneficiar diretamente a sociedade. A taxa de precipitação é uma medida da intensidade da precipitação. É medida calculando a quantidade de chuva que cai na superfície da terra por unidade de área por unidade de tempo.

As imagens do produto de precipitação GPM foram baixadas individualmente convertendo para média mensal, de abril de 2015 a abril de 2021. Os conjuntos de dados estão disponíveis via GIOVANNI, um aplicativo on-line desenvolvido pelo GES DISC que permite aos pesquisadores explorarem rapidamente os dados, de modo que a variabilidade espaço temporal, condições anômalas e padrões de interesse possam ser direta e facilmente analisados on-line antes de fazer o download opcional dos dados. Os formatos de download suportados incluem NetCDF, GeoTIFF e KMZ. Pode ser acessado através do portal [Giovanni - NASA](#).

Muitos estudos realizados no Brasil têm validado os produtos de precipitação GPM com dados de medições terrestres e tem encontrado ótimos resultados. [Santos et al. \(2019\)](#) comparou dados de precipitação estimados pelo GPM na região sul do Amazonas com dados da ANA (Agência Nacional de Águas) e dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e encontrou correlações significativas entre 0.74 e 0.95.

[Gadêlha \(2018\)](#) comparando dados de precipitação estimados pelo GPM com dados terrestres da ANA e o INMET no Brasil todo, dentre outras estatísticas, encontrou um coeficiente de correlação muito forte (em torno de 0.8) na escala mensal. [Silva \(2022\)](#) para validar as estimativas do GPM usou dados de estações pluviométricas da ANA da bacia do Rio Sapucaí, região Sudeste do país e encontrou boas correlações variando entre 0.5 a 0.8 indicando uma boa estimativa do GPM.

[Torres *et al.* \(2020\)](#) usou dados de estações terrestres da ANA na Bacia do Rio Sapucaí e do INMET na Bacia do Rio São Francisco com os dados obtidos dos pixels das imagens de precipitação GPM. Encontraram correlações muito altas e superiores a 0.9 em cinco sub-bacias do Alto, Médio e Baixo São Francisco e Alto e Baixo Sapucaí, e de 0.8 para o submédio São Francisco e Médio Sapucaí. No geral, dos estudos analisados, a média mensal tem apresentado melhor estimativa em relação aos produtos diários quando comparados com dados observados nas estações terrestres.

3.6 Dados de Evapotranspiração Total (ET) - FLDAS

A evapotranspiração (ET) é um componente crítico do ciclo hidrológico e desempenha um papel fundamental na redistribuição global de energia e água. A estimativa precisa de ET permite a quantificação dos balanços de água e energia de superfície, a previsão de eventos extremos (por exemplo, inundações e secas) e o diagnóstico de mudanças climáticas ([Liu *et al.*, 2023](#)). A Evapotranspiração Total (ET) é a soma da evaporação com a transpiração da planta. A taxa de evapotranspiração expressa a quantidade de água perdida de uma unidade de área de superfície por unidade de tempo. A unidade de tempo pode ser uma hora, dia, mês, ano e até uma década.

O projeto FLDAS (Land Data Assimilation System) é produto do Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET), uma instância personalizada da estrutura do NASA Land Information System (LIS) ([GESDISC, 2018](#)). A estrutura LIS da NASA foi projetada para modelagem hidrológica terrestre de alto desempenho e é o software que sustenta o FLDAS e da mesma forma, é usado em outros produtos de sucesso, como o NASA Global Land Data Assimilation System (GLDAS) e o North American Land Data Assimilation System (NLDAS). A adoção do LIS permite o aproveitamento de modelos de superfície terrestre existentes e gere conjuntos de umidade do solo, ET e outras variáveis com base em múltiplas entradas meteorológicas ou modelos de superfície terrestre. O objetivo do projeto FLDAS é alcançar um uso mais eficaz das limitadas observações hidro climáticas disponíveis ([McNally *et al.*, 2017](#)).

Os dados FLDAS são produzidos a partir do modelo de superfície terrestre (LSM) Noah versão 3.6.1, com três execuções de simulação, “C” e “CP” globalmente e “G” regionalmente na Ásia Central. Os LSMs em FLDAS requerem um grande conjunto de parâmetros invariantes no tempo e climatológicos da superfície terrestre, como vegetação, solos e topografia, entre outros. A simulação “C” que deriva os produtos usados neste estudo, refere-se à execução de simulação forçada pela análise retrospectiva da era moderna para pesquisa e aplicativos versão

2 (MERRA-2) combinada com dados de precipitação por infravermelho do grupo de riscos climáticos com dados de estação (CHIRPS) para medições de precipitação. Para regiões além do domínio CHIRPS, MERRA-2 é usado como entradas de precipitação.

Em novembro de 2020, todos os dados FLDAS foram pós-processados com a máscara terrestre MOD44W MODIS. Anteriormente, algumas caixas de grade sobre águas interiores tinham valores não omissos onde o modelo os considerava como dados de terra, em oposição a águas abertas. O pós-processamento corrigiu esse problema e mascarou todos os dados de saída do modelo em águas interiores. Este problema afetou apenas as variáveis de dados de saída do modelo, e todas as variáveis de forçamento meteorológico permaneceram inalteradas (GESDISC, 2018).

Os dados de evapotranspiração no modelo FLDAS usados neste estudo também foram adquiridos no aplicativo web GIOVANNI (usando o mesmo período dos dados de precipitação), com unidade expressa em $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$, mensal, em escala aproximada de 0,1 x 0,1 graus. O produto utilizado é a versão mais atual da simulação "C": FLDAS_NOAH01_C_GL_M_001. O FLDAS como já visto, compartilha muitos recursos com o GLDAS: ambos usam o NASA LIS 7 como estrutura de software subjacente, bem como os parâmetros de solos da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) e fornecem variáveis de entrada e saída semelhantes. As principais diferenças são as entradas meteorológicas, a resolução espacial (10 km) e a versão do modelo LSM (Noah-3.6.1).

Não foram encontrados muitos estudos que validaram o produto de evapotranspiração no modelo FLDAS. No entanto, nos estudos de Liu *et al.* (2023), foi avaliado vários produtos globais de estimativas de ET mensais incluindo o produto FLDAS em nível local e de bacias e encontraram boas relações com medições terrestres, com correlações variando entre 0.73 a 0.85 para o produto FLDAS, e com valores semelhantes para os outros produtos. De acordo com os autores, o desempenho dos produtos na escala da bacia é geralmente melhor do que na escala local.

Para este estudo, a fim de comparar o desempenho do produto FLDAS adquirido, também foram baixados os produtos GLDAS, que em tese possui boa validação e apresenta bom desempenho. Ao realizar testes estatísticos entre os dois modelos, ambos tiveram desempenhos semelhantes, no entanto, por conta da resolução do produto FLDAS de 10km x 10km em comparação com a resolução do GLDAS de 100 km x 100 km, o produto FLDAS teve melhor desempenho com a umidade do solo estimada pelos satélites SMOS (de 25km) e SMAP (de 9 km), e por isso o modelo FLDAS foi escolhido para análise neste estudo.

3.7 Análise Regional

Para analisar a umidade do solo, foram selecionados 36 pontos em áreas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica, sendo que para cada bioma foram selecionados três pontos contendo vegetação do tipo herbácea e arbustiva, florestas e cultivo (Figura 3.4). Os pontos foram selecionados no QGIS 3.22 (ferramenta de extração de coordenadas). Para seleção das áreas foi sobreposto uma camada *shapefile* dos biomas brasileiros, a classificação da cobertura de terra fornecido pelo site da Copernicus em *Copernicus land products*, e uma imagem do Google Earth para verificação. A classificação da cobertura do solo utilizada da Copernicus é do ano de 2019, numa resolução de 100 m, global (Buchhorn *et al.*, 2020).

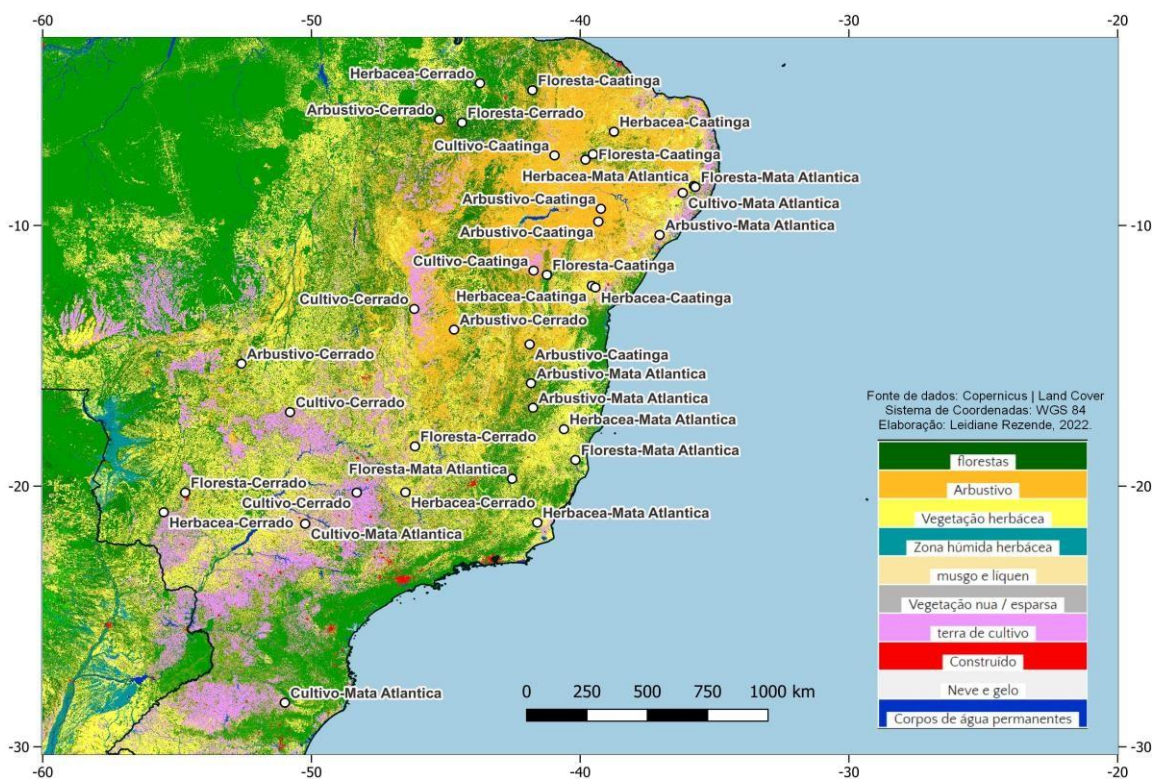


Figura 3.4: Distribuição espacial dos 36 pontos das coberturas vegetais de biomas do Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica - Classificação de Cobertura da Terra Copernicus.

Os mapas de cobertura do solo da Copernicus representam informações espaciais sobre diferentes tipos (classes) de cobertura física da superfície da Terra, por exemplo, florestas, pastagens, campos de cultivo, lagos, pântanos. Os mapas são fornecidos juntamente com camadas de campo contínuo de vegetação que fornecem estimativas proporcionais de cobertura vegetal para vários tipos de cobertura do solo.

Tendo em vista que se trata de um algoritmo de classificação global, vale observar que dentro de biomas brasileiros algumas inconsistências poderiam ser geradas dadas algumas características específicas, como do bioma Mata Atlântica cuja predominância é de formações florestais e que, portanto, formações campestres são áreas transacionais dentro deste bioma. Por isso, ao considerar a análise deste estudo, o conceito de formações herbáceas e/ou arbustivos são relativos e específicos de um determinado ponto e não são atrelados ao conceito geral do bioma.

3.8 Classificação climática regional

A Figura 3.5 representa a distribuição espacial de todos os pontos de acordo com a classificação climática de Köppen. A maioria dos pontos se encontram localizados no tipo climático *As* e *Aw*, mas também há pontos localizados no tipo *Am*, *CWb*, *BSh*, *Cfb*, *Cwa* e em áreas de transição entre *Cwa/Cwb*. Os climas *As*, *Aw* e *Am* são climas tropicais, megatérmicos, cuja temperatura média do mês mais frio do ano é maior que 18°C e há presença de forte precipitações anuais (que superam a evapotranspiração potencial anual), com estação invernal pouco expressiva.

O tipo *As* apresenta chuvas no inverno e/ou outono, além das chuvas no verão. O tipo *Aw* apresenta chuvas no verão e/ou outono, e o tipo *Am* é do tipo monção, com precipitação anual média maior que 1500 mm e precipitação no mês mais seco menor que 6 mm. O clima *BSh* é um clima árido (seco e quente) com precipitação anual inferior a 500 mm, cuja evapotranspiração potencial supera a precipitação anual, cuja temperatura média anual é maior que 18°C.

Os climas *Cwb*, *Cfb* e *Cwa* são do tipo temperado ou temperado quente. São climas mesotérmicos, cuja temperatura do ar dos 3 meses mais frios pode ser menor que 18°C, contendo estações de verão e inverno bem definidas. O clima *Cwb*, apresenta chuvas no verão e/ou outono, cujo verão é mais temperado, com temperatura média no mês mais quente menor que 22°C. O clima *Cfb* é um clima mais úmido com ocorrência de precipitação em todos os meses do ano, com estação seca quase inexistente, com verão temperado (temperatura média no mês mais quente menor que 22°C) e o clima *Cwa* apresenta chuvas também no verão (verão quente), com temperatura média do as no mês mais quente maior que 22°C (Alvares *et al.*, 2013).

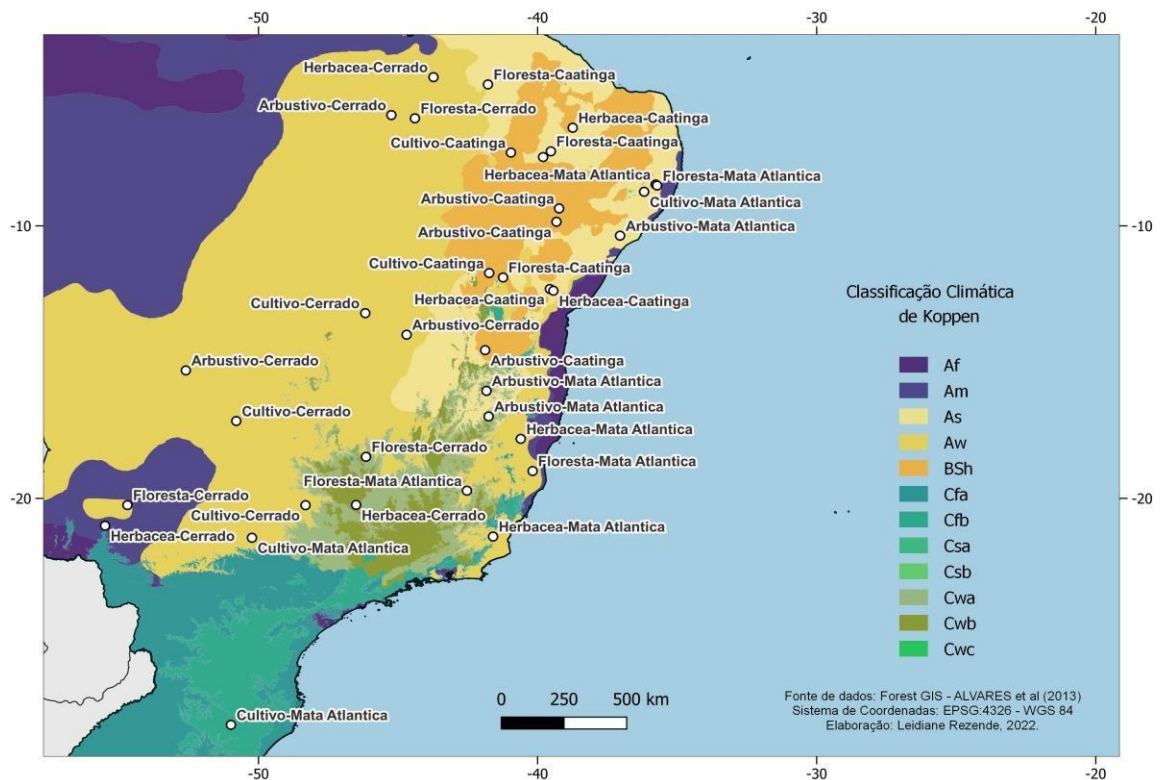


Figura 3.5: Mapa da Classificação Climática de Köppen.

3.9 Produção de séries temporais

Define-se uma série temporal como sendo um conjunto de dados observados e ordenados segundo um parâmetro de tempo, cujos dados devem apresentar uma dependência serial entre eles. O objetivo da análise de séries temporais é identificar padrões não aleatórios na série a partir de uma variável de interesse. Em alguns casos o objetivo pode ser fazer previsões, enquanto em outros é compreender a estrutura da série ou sua relação com outras séries (Ehlers, 2007).

De acordo com Morettin e Castro Tolo (2006), com o objetivo de descrever o comportamento das séries, são construídos modelos probabilísticos ou modelos estocásticos, no domínio do tempo ou de frequência. No princípio da estacionariedade, a série se desenvolve no tempo aleatoriamente ao redor de uma média constante, refletindo equilíbrio estável. No entanto, a maior parte das séries na prática apresentam alguma forma de não-estacionariedade, apresentando no geral alguma tendência linear.

Considerando que a maioria dos procedimentos de análise estatística de séries temporais são consideradas estacionárias, torna-se necessário transformar os dados originais caso não-

estacionários. A transformação mais comum consiste em tomar diferenças sucessivas da série original, até obter uma série estacionária. Essa transformação é importante, uma vez que para análise de autocorrelação, a tendência precisa ser removida para que a autocorrelação tenha significado (Ehlers, 2007).

Há vários modelos adequados para dados de séries temporais, chamados de processos estocásticos, que pode ser definido como uma coleção de variáveis aleatórias ordenadas no tempo e definidas em um conjunto de pontos T , que pode ser contínuo ou discreto. No caso de análise temporais, tem-se apenas uma realização do processo estocástico e uma única observação da variável aleatória no tempo t denotada por x_t no caso contínuo e x_t , para $t = 1, \dots, N$ no caso discreto (Ehlers, 2007).

De acordo com Ehlers (2007), uma maneira de descrever um processo estocástico é através da distribuição de probabilidade conjunta de X_{t_1}, \dots, X_{t_k} para qualquer conjunto de tempos t_1, \dots, t_k e qualquer valor de k . Segundo o autor, na prática costuma-se descrever um processo estocástico através de funções de média, variância e autocovariância.

Alguns modelos para descrição de séries temporais tratam as causas de flutuações e de suavização, como a análise feita através de filtros lineares, que converte uma série observada em outra, contendo valores suavizados, à exemplo, o filtro de média móvel. Técnicas desse tipo assumem que os valores extremos da série representam a aleatoriedade e assim, por meio da suavização desses extremos, pode-se identificar o padrão básico (Morettin e Castro Toloi, 2006; Ehlers, 2007).

3.10 Processamentos

A umidade do solo dos produtos SMOS e SMAP foi extraída com base nas coordenadas dos 36 pontos selecionados. O mesmo foi feito para os dados de NDVI do sensor MODIS, extraído através da plataforma *Google Earth Engine* – GEE. Considerou um raio de 1 km para os pontos de umidade do solo de campo das duas estações, e de 25 km e 9 km com base na resolução espacial SMOS e SMAP, respectivamente, para os 36 pontos. Da construção da base de dados a análise estatística dos dados, ambos os procedimentos foram feitos através de programas desenvolvidos em linguagem Python 3.10.

Os produtos utilizados do satélite SMOS, foram de Nível Global 3 – L3 na grade EASE-2 de 25 km, de 2010 a 2021, distribuídos gratuitamente pelo Barcelona Expert Center - BEC. Os valores extraídos foram tanto da órbita ascendente como descendente, que depois foram agrupados formando uma única série para cada ponto.

Os produtos utilizados do satélite SMAP também foram de Nível 3: *L3_SM_P_E* (SMAP Enhanced L3 Radiometer Global e Polar Grid Daily 9 km EASE-Grid Soil Moisture, Versão 5), do ano de 2015 a 2021. Este produto é um composto diário de umidade do solo SMAP Nível-2 que é derivado de temperaturas de brilho interpoladas de SMAP Nível-1C.

Todas as séries temporais tiveram seus valores interpolados com o objetivo de ajustar a série temporal. Foi considerado para a interpolação linear falhas com uma média de 3 a 5 dias. Para as séries temporais que constavam falhas maiores, assumiu-se o gap da falha atribuindo como um período sem dado para ambas as séries a serem correlacionadas.

A interpolação linear é basicamente o processo que utiliza dados conhecidos para estimar valores desconhecidos. A interpolação linear é calculada com base na média entre valores anteriores e posteriores do dado ausente, obtendo-se a diferença entre o dado real e o observado. Como os dados das séries analisadas não contém alterações bruscas, a interpolação linear é satisfatória para o preenchimento de dados ausentes.

Para obter um melhor desempenho de correlação e eliminar os ruídos das séries temporais SMOS e SMAP, foi aplicado um filtro de Média Móvel (MA – Moving Average), que está entre os principais métodos para suavizar dados no domínio do tempo. Segundo [Tsai e Philpot \(1998\)](#), todas abordagens de suavização removem o ruído aleatório dos espectros independente se a computação derivada ter sido especificada ou não.

De acordo com [Vaiphasa \(2006\)](#), o conceito de filtro de média móvel é simples, pois toma o valor espectral médio de todos os pontos dentro de uma janela especificada (ou seja, tamanho do filtro) como o novo valor do ponto médio da janela. Quanto maior o tamanho do filtro, mais suave é o resultado, conseqüentemente, detalhes espectrais podem ser suprimidos. Portanto, o tamanho do filtro é o principal fator que afeta os resultados. A equação 3.1 ilustra este procedimento.

$$g(t) = \frac{\sum_{s=t-n_{dias}}^{t+n_{dias}} (f(s))}{(2 \times n_{dias}) + 1} \quad (3.1)$$

onde $g(t)$ é o valor filtrado, $f(s)$ são os valores da função original e n_{dias} corresponde aos números de dias antes e depois do momento t .

Estatisticamente, neste estudo, a média móvel foi aplicada considerando n elementos anteriores e n elementos posteriores, gerando um ponto médio através de $n/2$. Dessa forma, ao especificar o tamanho do filtro é calculado um ponto médio, e à medida que essa janela avança, novos valores médios são definidos, constituindo uma nova série temporal com valores

suavizados. A ideia de usar algum tipo de suavização é que a tendência num instante t será estimada usando observações Z_s , com s ao redor de t . No caso das médias móveis é usado um filtro linear transformando a série Z_t na série Z_{t^*} (Morettin e Castro Toloi, 2006).

Testes foram feitos neste estudo a fim de identificar um melhor padrão de filtragem, aplicando janelamentos de 5, 10, 15, 20, e 30 dias (períodos). A tendência geral, como segue a estatística, era de que quanto maior o filtro aplicado, melhor o resultado obtido em relação a correlação. Porém, optou-se por manter para a análise final, o período de 15 dias para filtragem, tornando os dados estimados de umidade do solo mais suaves, porém sem o risco de "forçar" muito a série e superestimar valores.

Neste estudo é pressuposto que há um atraso relativo entre a resposta espectral da vegetação e a umidade do solo. E para avaliar o desempenho e a relação da umidade do solo do SMOS, SMAP e com a resposta espectral da vegetação a partir do NDVI, foi utilizado a técnica de correlação cruzada. Para trabalhar com conjuntos de dados deslocados no tempo assumiu-se para este estudo, que os dados do NDVI $\rightarrow x(t - \tau)$ desloca-se $x(t)$ de τ dias em função da umidade do solo.

A técnica de correlação cruzada é utilizada para identificar possíveis relações causais até então desconhecidas entre as variáveis e é útil para mensurar a intensidade e direção de correlação entre duas variáveis. O seu coeficiente de correlação é calculado em diferentes pontos de deslocamento sob um domínio do tempo para as variáveis (x,y) , portanto, o método é definido como uma aplicação iterativa da correlação, onde em cada iteração uma das variáveis recebe aplicação de atraso no sinal (Miranda, 2017; Medel *et al.*, 2021). A equação 3.2 explicita este procedimento.

$$f \star g = \frac{\sum(f_i - \bar{f})(g_i - \bar{g})}{\sqrt{(\sum(f_i - \bar{f})^2)(\sum(g_i - \bar{g})^2)}} \quad (3.2)$$

onde f e g são as duas funções que queremos relacionar, \bar{f} e \bar{g} representam suas médias respectivas. A correlação cruzada consiste em determinar o quanto a função f deve ser deslocada ao longo do eixo x (tempo) para ter a maior correspondência possível com a função g . A operação consiste em deslocar a primeira função ao longo da segunda até maximizar seu produto ($f \star g$). A correlação cruzada normalizada tem a vantagem de ser insensível à escala.

De acordo com Miranda (2017), em alguns pontos de deslocamento haverá a presença de picos, e cada um deles passa a representar um momento em que a correlação foi alta para

aquela específica combinação das variáveis. Dessa forma, considerando um deslocamento k , cujo valor foi alto, é designado que x tem alta correlação com y com um atraso entre as variáveis de k unidades de tempo (Medel *et al.*, 2021).

O coeficiente de correlação de Pearson é a medida mais usada para analisar a dependência entre duas variáveis, possibilitando a identificação de padrões. A correlação das variáveis é dada pelo diagrama de dispersão, em que os pares ordenados formam uma nuvem de pontos, que determina o grau de correlação e fornece um indicador quantitativo da relação linear entre as duas variáveis. Valores com coeficiente positivo indicam que as variáveis são diretamente correlacionadas. Valores negativos indicam que as variáveis são inversamente correlacionadas. Valores próximos de zero, indicam ausência de linearidade e valores próximos de 1 indicam forte correlação (Miranda, 2017).

Os dados de precipitação e evapotranspiração total mensais, foram analisados em conjunto as médias mensais calculadas a partir dos dados diários de umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP. Foi aplicado um teste de Regressão Linear Múltipla avaliando o coeficiente de determinação (R^2). O coeficiente permite avaliar o ajuste entre a média mensal de umidade de solo (variável dependente) em relação as variáveis mensais precipitação e evapotranspiração total (variáveis independentes).

Montgomery *et al.* (2015); Morettin e Castro Toloi (2006) complementam que esse critério varia entre 0 e 1, de modo que quanto maior o valor de R^2 , melhor a qualidade de ajuste do conjunto de dados. Dessa forma, considerando um R^2 maior que 0.5, significa que haverá maior representatividade das variáveis x explicarem a variável y . No modelo foi aplicado o intervalo de confiança de 95%, considerando portanto, um valor significativo cujo valor P (significância) seja menor que 0,05. O F/f de significação relaciona-se ao teste F , o qual avalia se o modelo proposto é útil para explicar a variável dependente, buscando identificar se pelo menos uma das variáveis independentes está relacionada à variável dependente. Assim, o F de significação deve ser $\leq 0,005$ para que o modelo seja considerado útil, visto que avalia a significância estatística geral do modelo estimado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação das estimativas de umidade do solo do SMOS e in-situ

Os dados de campo foram obtidos com o intuito de validar a umidade do solo estimada pelo satélite SMOS. Foi aplicado uma estatística de regressão simples cujo resultado é apresentado na Figura 4.1. Como pode ser observado, os dois pontos com medição de umidade do solo de campo e a umidade do solo estimada pelo satélite SMOS resultaram em um R^2 fraco. Os modelos apresentados na figura estão baseados na média mensal, que de todo modo ilustra um ajuste de tendência positivo entre os dados (houve um ajuste melhor considerando a média trimestral).

Estudos como de Paredes-Trejo e Barbosa (2017), Araújo *et al.* (2018), Juca *et al.* (2019), Souza (2019), Spatafora *et al.* (2020) obtiveram correlações em torno de 0.5 entre a umidade do solo de campo e produtos SMOS, no entanto, os estudos foram realizados em áreas semiáridas no geral. Áreas com tendência a déficit hídrico tendem a apresentar melhores resultados devido a vegetação se tornar refém de umidade. Observa-se que quando a umidade é suficiente e as raízes das plantas conseguem absorvê-la, há uma melhora quase que imediata das atividades fisiológicas da planta, ocasionando boa correlação com a umidade do solo.

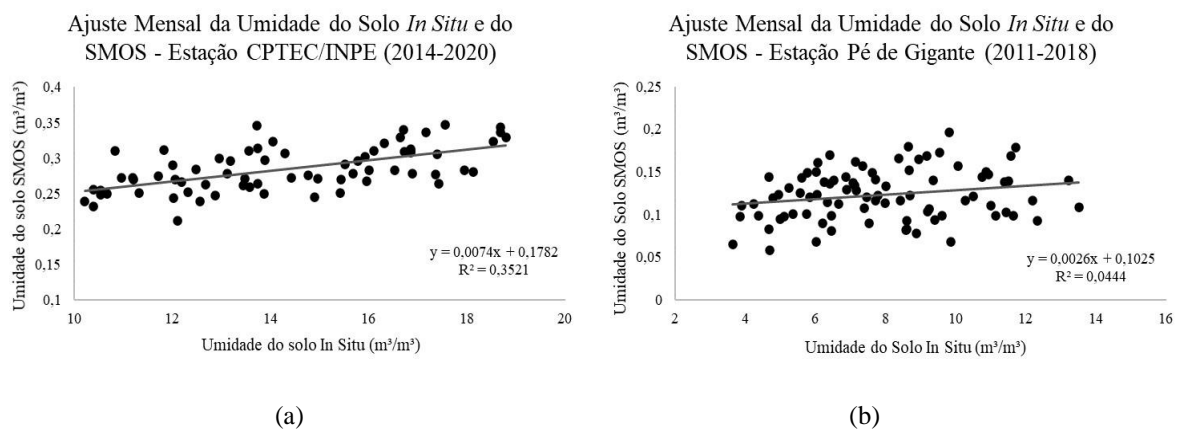


Figura 4.1: Gráficos de dispersão com a média mensal dos dados de umidade do solo de campo e do SMOS: a) estação CPTEC, b) estação Pé de Gigante.

Também é essencial entender que a representatividade de cada conjunto de dados de satélite desempenha um papel crucial quando validado. Segundo Portal *et al.* (2020), no caso do produto SMOS, os dados são armazenados em arquivos matriciais com células de grade espacial de 25 km. As informações contidas nessas células representam um valor médio de área, enquanto as medições in-situ representam um ponto isolado.

[Portal et al. \(2020\)](#) avalia que além do erro de representatividade devido à comparação das medidas de escala de pontos versus as médias de área, a incompatibilidade entre as observações de satélite e as medidas in-situ também pode ser originada pela profundidade de penetração das frequências de micro-ondas na banda L, que é em média de 5 cm, mas também depende do próprio teor de umidade do solo (com maior penetração em solos mais secos). Além disso, os autores também observam que a temperatura da superfície usada nas recuperações do SMOS, é derivada de modelos e não é medida.

Outra observação importante de acordo com [Souza \(2019\)](#), no caso de uma validação, o ideal é utilizar um conjunto de dados de umidade do solo in-situ que corresponda em média a camada superficial. Nesta análise a variação da profundidade de detecção era maior que 20 cm, por isso pouca representatividade com a umidade do solo estimada pelo SMOS. Nos estudos de [Souza \(2019\)](#), por exemplo, a autora utilizou somente a camada que corresponde aos 10 cm do solo para validação do produto SMOS.

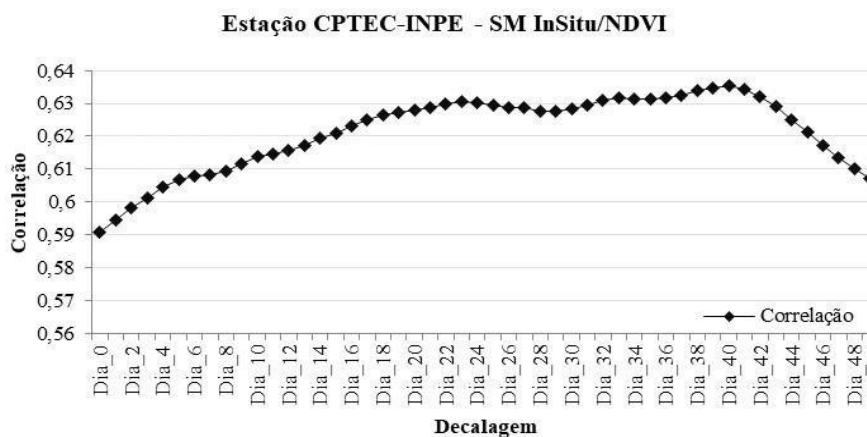
[Souza \(2019\)](#) avalia que a recuperação da umidade do solo do SMOS em dias de maior precipitação pode ser afetada devido a um encurtamento da profundidade de detecção pelo sensor MIRAS, dada a frequência e a polarização (sendo um radiômetro interferométrico bidimensional). [Souza \(2019\)](#) afirma que os sensores que operam nesse canal geram produtos de baixa resolução espacial e que o sinal pode sofrer interferência de grandes eventos de chuva e de áreas muito urbanizadas, devido à heterogeneidade do pixel e da interferência de radiofrequência.

De acordo com [Spatafora et al. \(2020\)](#), os dados de sensores por satélites têm permitido a obtenção de medições de umidade do solo com resoluções espaciais e temporais suficientes para atender aplicações globais. No entanto, a validação desses produtos de umidade do solo é difícil devido à natureza dinâmica, a heterogeneidade da superfície do solo e o número escasso de medições in-situ.

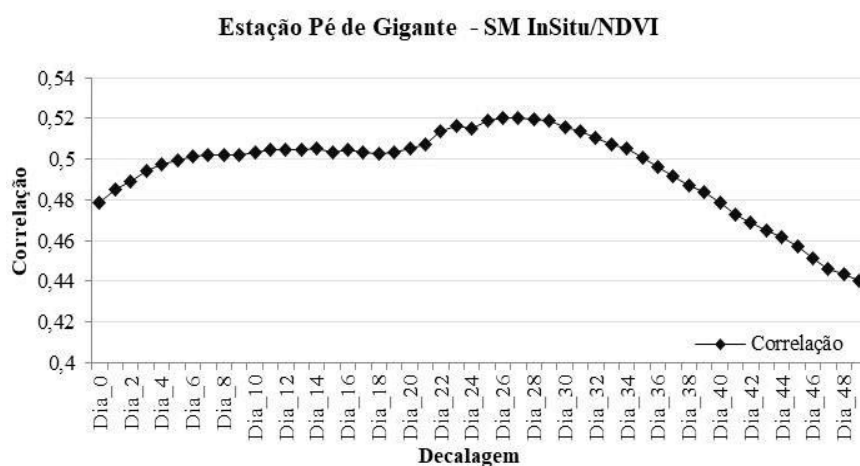
Com base nessa análise, e dada a dificuldade de encontrar produtos de umidade do solo medidos em campo no Brasil para validar outras áreas, as análises posteriores serão feitas com base na relação entre a umidade do solo e o NDVI considerando os dois sensores SMOS e SMAP. Esta seção é parte da primeira etapa de análise deste estudo, e uma vez que não foi encontrado bons resultados, servirá de base para elucidar estudos posteriores que possam vir a desenvolver novas metodologias de análise e que necessitam rever tais conceitos ao considerar dados de campo para validação.

4.2 Relação da umidade do solo in-situ e o NDVI

Nessa etapa foi correlacionada a umidade do solo obtida de medições in-situ e o NDVI para avaliar a relação da vegetação com a umidade do solo em escala pontual, para então avaliar a relação do NDVI com a umidade do solo estimada pelos sensores dos satélites SMOS e SMAP na segunda etapa da pesquisa. Para as estações CPTEC-INPE e Pé de Gigante comparando os dados de umidade do solo de campo e o NDVI calculado de 1 km, as correlações foram de 0.63 e 0.52 respectivamente. Para essa avaliação foi utilizado o mesmo programa desenvolvido para aplicação da correlação cruzada, porém sem a aplicação do filtro de média móvel para suavização dos dados de umidade do solo, considerando valores reais já que são medições pontuais (Figura 4.2).



(a)



(b)

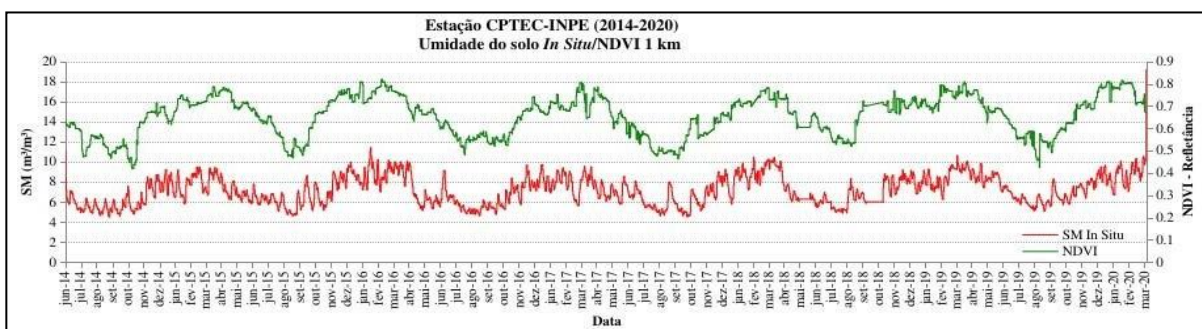
Figura 4.2: Gráficos do resultado da correlação cruzada entre a umidade do solo in-situ e o NDVI de 1km para as estações CPTEC/INPE e Pé de Gigante, representado o período de decalagem.

Foi observado também nessa relação o tempo de atraso de resposta da vegetação representada pela melhora do NDVI dos dois pontos em dias de defasagem (ou decalagem) em relação a umidade do solo. Para a estação CPTEC-INPE houve uma defasagem em torno de 40 dias e de 26 dias para a área da estação Pé de Gigante. Ambas possuem vegetação do tipo herbácea/arbustiva (de acordo com o que foi observado na imagem de satélite) e o tempo de resposta da vegetação depende de quando a umidade do solo esteve disponível, condizente com a zona raiz da planta.

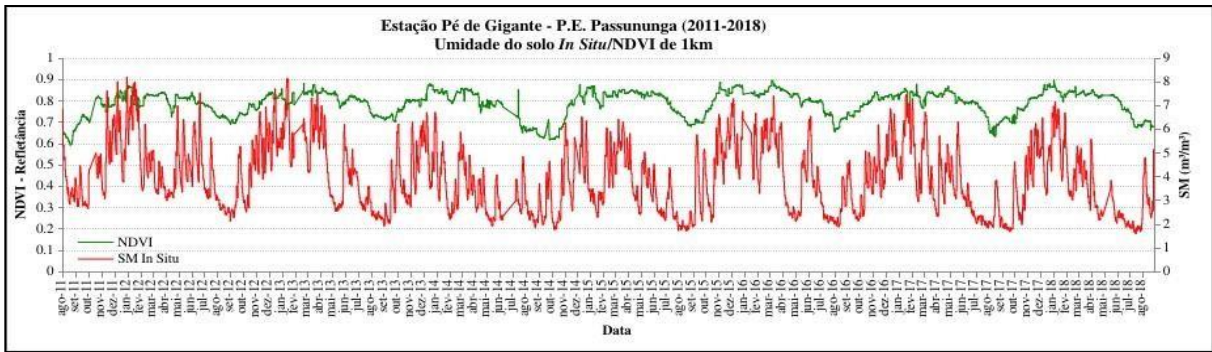
A Figura 4.3 apresenta a distribuição sazonal das séries temporais da umidade do solo in-situ e a resposta espectral da vegetação de acordo com o período analisado. Ao longo de toda série, o NDVI se ajusta bem a umidade do solo de campo, sendo maior em períodos mais úmidos e baixo em função dos períodos secos da região. Foi observado que os picos alternados da umidade do solo medido em campo se devem apenas em função da profundidade da detecção da umidade do solo diária medida pelo sensor em campo.

Considerando a Figura 4.2 e a Figura 4.3 a análise dessa relação é feita se atendo ao aumento do NDVI a partir de um pico de umidade do solo observada, ou seja, considerando o tempo de resposta da vegetação à umidade do solo, haverá em subsequência a melhora do NDVI, representado em picos mais altos. O NDVI nesta análise variou em média de 0.5 (período de baixos valores) para 0.8 (período de valores mais altos) para essas duas áreas.

Para exemplificar melhor os modelos, de acordo com os gráficos da estação CPTEC-INPE, dado o período de defasagem de 40 dias, a partir do primeiro registro de umidade do solo, os valores mais altos de NDVI ocorrerão no mês seguinte, passado esse período. Uma variação maior ou menor do NDVI vai depender da característica da vegetação e da disponibilidade da umidade do solo. Observa-se que o NDVI segue a média sazonal do que seria o acúmulo da média de umidade do solo no período (que nos gráficos são mantidos em dados diários).



(a)



(b)

Figura 4.3: Gráficos das séries temporais representando o índice da vegetação e a umidade do solo das estações CPTEC/INPE e Pé de Gigante.

4.3 Relação da umidade do solo estimada (SMOS e SMAP) e o NDVI

4.3.1 Umidade do solo e NDVI

Uma vez que a validação das estimativas do satélite SMOS e medições de campo não foram satisfatórias, devido à escassez de dados de umidade de solo de medições de campo, uma outra metodologia será abordada neste estudo, que consiste na relação pré-existente entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP com o respectivo NDVI dos 36 pontos amostrais selecionados através de ferramentas GIS (*Geographic Information System*).

Os resultados são apresentados na Tabela 4.1. A Tabela encontra-se subdividida em linhas: associando o tipo de cobertura e o bioma em que se localiza cada um dos pontos (três para cada tipo de cobertura); e em colunas: subdividindo os resultados das correlações SMOS e SMAP, seguido pelo tempo de resposta da vegetação de acordo com cada tipo de cobertura/bioma e na sequência, pelo resultado estatístico dos modelos de Regressão Linear Múltipla das médias mensais da umidade do solo dos produtos SMOS e SMAP com a precipitação e evapotranspiração (que será discutido em outra seção).

Observando os resultados de ambas as estimativas SMOS e SMAP, diferentemente do que foi encontrado na literatura, as estimativas do satélite SMAP não apresentou desempenho melhor que as estimativas do satélite SMOS em totalidade. A diferença de performance entre os satélites varia de um ponto a outro, não se associando a nenhum tipo de cobertura ou bioma. No geral, os valores se assemelham entre si, excetuando alguns pontos onde o satélite SMOS ou SMAP teve boa correlação enquanto para outro foi obtida correlação mais baixa. É válido considerar neste estudo que o período de análise do SMAP foi menor que do SMOS, além disso, a série temporal do NDVI de 9km utilizada apresentou mais falhas, e por isso pode ter

impactado na relação temporal. Dos estudos analisados, a tendência era da melhor performance do SMAP.

Tabela 4.1: Tabela de Resultados: Correlação Cruzada e Regressão Múltipla

Vegetação/Bioma	Coordenadas		Umidade do Solo → NDVI*		Tempo de Resposta da Vegetação	Umidade do Solo → P + ET**	
	Lon.	Lat.	SMOS	SMAP		SMOS	SMAP
Herbácea / Cerrado	-55.495767	-21.001077	0.38	0.37	09 - 29 dias	0.39	0.32
	-46.500408	-20.23722	0.67	0.7		0.8	0.84
	-43.726161	-4.541553	0.7	0.75		0.85	0.86
Herbácea / Caatinga	-39.556569	-12.314319	0.65	0.65	12 - 15 dias	0.38	0.39
	-39.430474	-12.377272	0.64	0.66		0.32	0.32
	-38.737949	-6.397683	0.66	0.65		0.87	0.88
Herbácea / Mata Atlânt.	-41.591212	-21.398796	0.53	0.44	14 - 21 dias	0.4	0.28
	-40.599841	-17.814052	0.54	0.37		0.44	0.39
	-35.765933	-8.479521	0.63	0.67		0.51	0.67
Arbustivo / Cerrado	-52.601571	-15.301674	0.62	0.67	18 - 62 dias	0.85	0.89
	-44.68932	-13.99262	0.61	0.64		0.86	0.87
	-45.236903	-5.932958	0.61	0.62		0.85	0.85
Arbustivo / Caatinga	-41.875682	-14.558145	0.69	0.63	13 - 19 dias	0.69	0.81
	-39.225389	-9.357678	0.57	0.53		0.69	0.72
	-39.319615	-9.848756	0.58	0.56		0.61	0.67
Arbustivo / Mata Atlânt.	-41.827671	-16.052776	0.67	0.55	12 - 43 dias	0.66	0.68
	-41.750877	-16.991755	0.61	0.63		0.73	0.79
	-37.041521	-10.358467	0.68	0.69		0.81	0.81
Floresta / Cerrado	-54.694567	-20.244408	0.53	0.55	13 - 40 dias	0.54	0.58
	-46.14595	-18.472344	0.67	0.75		0.81	0.81
	-44.392163	-6.052274	0.61	0.7		0.78	0.88
Floresta / Caatinga	-41.235153	-11.891437	0.56	0.48	12 - 36 dias	0.4	0.61
	-39.521689	-7.262984	0.63	0.65		0.83	0.84
	-41.775235	-4.808175	0.76	0.72		0.93	0.94
Floresta / Mata Atlânt.	-35.712458	-8.519011	0.63	0.67	14 - 31 dias	0.5	0.66
	-40.173832	-18.994743	0.37	0.38		0.44	0.39
	-42.528388	-19.716839	0.43	0.5		0.33	0.51
Cultivo / Cerrado	-48.311926	-20.247408	0.11	0.54	31 - 60 dias	0.24	0.6
	-46.170917	-13.200567	0.77	0.69		0.91	0.92
	-50.794744	-17.159109	0.64	0.73		0.76	0.9
Cultivo / Caatinga	-41.730003	-11.729989	0.54	0.55	13 - 28 dias	0.85	0.88
	-39.799166	-7.473467	0.7	0.64		0.74	0.82
	-40.950829	-7.309138	0.63	0.68		0.83	0.88
Cultivo / Mata Atlânt.	-50.985436	-28.307342	0.24	0.24	10 - 57 dias	0.41	0.45
	-50.231645	-21.443559	0.47	0.46		0.48	0.55
	-36.178716	-8.745760	0.63	0.61		0.67	0.66

*: Resultados da Correlação Cruzada entre a Umidade do Solo estimada pelos sensores e o NDVI.

** : Resultados de Regressão Múltipla (R^2) entre as variáveis explicativas Evapotranspiração (ET) e Precipitação (P) e a variável explicada Umidade do Solo (SMOS e SMAP).

Em síntese geral, este estudo apresenta resultados na mesma ordem de grandeza que os estudos analisados que correlacionam índices de vegetação com umidade do solo. A maioria dos pontos apresentaram correlação que variaram entre 0.5 a 0.75. Atendo a distribuição espacial desses dados, os sensores dos satélites SMOS e SMAP se mostraram bastante úteis para avaliar espacialmente a umidade do solo no Brasil, uma vez que o NDVI está bem correlacionado com a umidade do solo. Considerando que há uma relação intrínseca entre essas variáveis, a combinação de índices de vegetação a partir de sensores ópticos com a umidade do solo de sensores passivos se mostrou eficaz para avaliar a distribuição da umidade do solo.

Farrar *et al.* (1994) mostraram que o NDVI variava com a umidade de solo nas savanas da África Austral. Gillies *et al.* (1997) estimaram a umidade superficial do solo com temperatura radiante e cobertura vegetal fracionada derivada de medições de sensoriamento remoto. Adegoke e Carleton (2002) avaliaram que o NDVI do Advanced Very High Resolution Radiometer – AVHRR foi fortemente correlacionado com a umidade de solo em defasagem de até 8 semanas em relação ao cinturão de milho dos EUA. Gu *et al.* (2008) monitoraram o estresse hídrico na vegetação usando NDVI e NDWI. Mallick *et al.* (2009) estimaram a umidade superficial de solos cultivados com base na temperatura da superfície e NDVI. Cho *et al.* (2010) descobriram que tanto a água foliar quanto os índices de vegetação de clorofila derivados da espectroscopia de imagem no nível do dossel, podem ser usados para determinar a qualidade do local em termos de disponibilidade de água no solo em plantações de *Eucalyptus grandis* na África do Sul (Liu *et al.*, 2012).

Os gráficos das Figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 ilustram os pontos que apresentaram melhor correlação para cada tipo de cobertura dos três biomas. Os gráficos em tons de vermelho e verde representam a relação do NDVI com a umidade do solo do SMOS (≈ 10 anos de dados) e os gráficos em tons de azul e laranja ilustram as relações entre o NDVI e a umidade do solo do SMAP (≈ 5 anos de dados).

No programa desenvolvido para aplicação da correlação cruzada, foi gerado uma planilha de resultados contendo gráficos do período analisado com todas as iterações definidas em cada aplicação para todos os 36 pontos. Os gráficos correspondem ao dia em que foi observado melhor correlação a partir do resultado obtido do processamento e iterações, em função da decalagem, ou seja, o melhor dia de resposta do NDVI a umidade do solo. Exemplo: se a melhor correlação foi observada em 15 dias, o gráfico apresentado se refere ao 15^a dia desde a primeira iteração.

Através desses gráficos é possível identificar a variação sazonal do período. No geral, os picos de NDVI acompanham os picos da umidade do solo nos períodos mais úmidos, e tende a diminuir para os períodos secos. Os valores de NDVI variaram de 0.2 (período mais seco, que corresponde a menor umidade do solo no período) a 0.45 (período mais úmido, que corresponde ao aumento da umidade do solo). O ajuste entre as duas variáveis nos gráficos temporais depende do tempo de resposta da vegetação, que variou de acordo com as características de cada ponto analisado.

As espécies vegetais do bioma Caatinga, por exemplo, devido a um período mais longo de estresse hídrico tendem a apresentar picos de NDVI mais acentuados, que se deve há um menor tempo de resposta da vegetação nessas áreas (mínimo \approx 12 dias). A melhora do vigor da vegetação nessas áreas, tanto para áreas da Caatinga, quanto para os tipos herbáceas no geral, também pode ser associado ao contato imediato da planta com a umidade atmosférica, que pode causar rápida alteração nos estômatos da planta (se em processo de estresse hídrico), uma vez que eles se fecham em forma de defesa quando em regime de escassez. Essa observação é feita, considerando que alguns modelos de gráficos de correlações para essas áreas já estão bem correlacionados desde a primeira iteração.

As áreas de cultivo selecionadas nos três biomas também tiveram comportamento semelhante para os pontos com boas correlações, no entanto, o tipo de cultivo é desconhecido neste estudo e dificulta a análise dessa variação entre os pontos, podendo ser a causa. Em função dessa variação encontrada nas séries temporais relacionadas a áreas de cultivo, é justo considerar que as áreas de cultivos não são adaptadas ao meio, como as coberturas nativas, por isso podem demorar a dar resposta por meio do vigor. A resposta depende, portanto, do tipo (estrutura/fenologia) e o meio que se encontra, podendo responder de imediato a umidade que chega, seja por precipitação ou irrigação, que por não serem espécies adaptadas podem estar sempre em regime de estresse hídrico, ou não (a depender de outros fatores).

[Schnur et al. \(2010\)](#) destacam que em ambientes semiáridos por ter menor quantidade de biomassa que os ambientes úmidos, o NDVI torna-se mais sensível, por isso sugerem que o NDVI pode ser melhor estimador de umidade do solo na zona radicular para ambientes mais semiáridos. Segundo [Wang et al. \(2007\)](#) em um ambiente semiárido, onde a umidade de solo é o principal fator de controle para o crescimento da vegetação, o NDVI muda intimamente com a umidade do solo, possuindo padrão sazonal semelhante, principalmente na estação quente.

Dos estudos que foram realizados no Brasil como de [Juca et al. \(2019\)](#) e [Souza \(2019\)](#), as melhores correlações são associadas em função do ambiente que contém maior estresse

hídrico. Uma tendência padrão observada em todos os estudos como de [Ribeiro *et al.* \(2019\)](#), [Juca *et al.* \(2019\)](#) e [Souza \(2019\)](#), onde há muita precipitação, haverá alta da umidade do solo, tanto na superfície, quanto na zona raiz, e conseqüentemente alto valor de NDVI, já que as plantas teriam disponibilidade de água suficiente para fazer a fotossíntese. [Araújo *et al.* \(2018\)](#), avaliaram que os valores maiores de correlação foram associados ao volume de precipitação, uma vez que a tendência de flutuação da umidade do solo é condicionada pela dinâmica de chuvas.

De acordo com [Liu *et al.* \(2012\)](#), durante a estação chuvosa, quando a umidade do solo é suficiente, a mudança da umidade do solo não leva à mudança perceptível nos índices de vegetação com base na verdura ou conteúdo de água do dossel. No entanto, durante a estação seca, os índices de vegetação tornam-se mais responsivos a mudanças de umidade do solo, levando a relações lineares significativas. Tal análise indica que os índices de vegetação são melhores indicadores de umidade do solo disponível para as plantas, quando a água se torna um recurso limitado.

Segundo [Schnur *et al.* \(2010\)](#), a umidade do solo da zona radicular controla as condições de saúde e cobertura da vegetação superficial, especialmente em áreas áridas e semiáridas. Para locais úmidos, [Wang *et al.* \(2007\)](#) avaliam que a umidade sazonal do solo é muito mais alta do que nas regiões semiáridas. Nesse caso, a disponibilidade de água no solo não é um fator importante de controle para o crescimento da vegetação e o NDVI e a umidade de solo tendem a possuir padrões sazonais diferentes, portanto o valor de R entre o NDVI e a umidade do solo pode aumentar numa série dessazonalizada.

[Silva \(2018\)](#) considera que o teor de água no perfil do solo é influenciado por atributos do solo como textura, mineralogia, matéria orgânica, estrutura etc., e é influenciado pelo clima, ao considerar a quantidade de chuvas e os períodos secos, além da disponibilidade de irrigação, processos hidrológicos e cobertura do solo. Apesar dos sensores remotos serem utilizados com sucesso para estimar a umidade do solo, é uma informação que se limita a poucos centímetros abaixo da superfície e não contempla toda zona de extração de água pelas plantas, por isso depende muito da fenologia da planta.

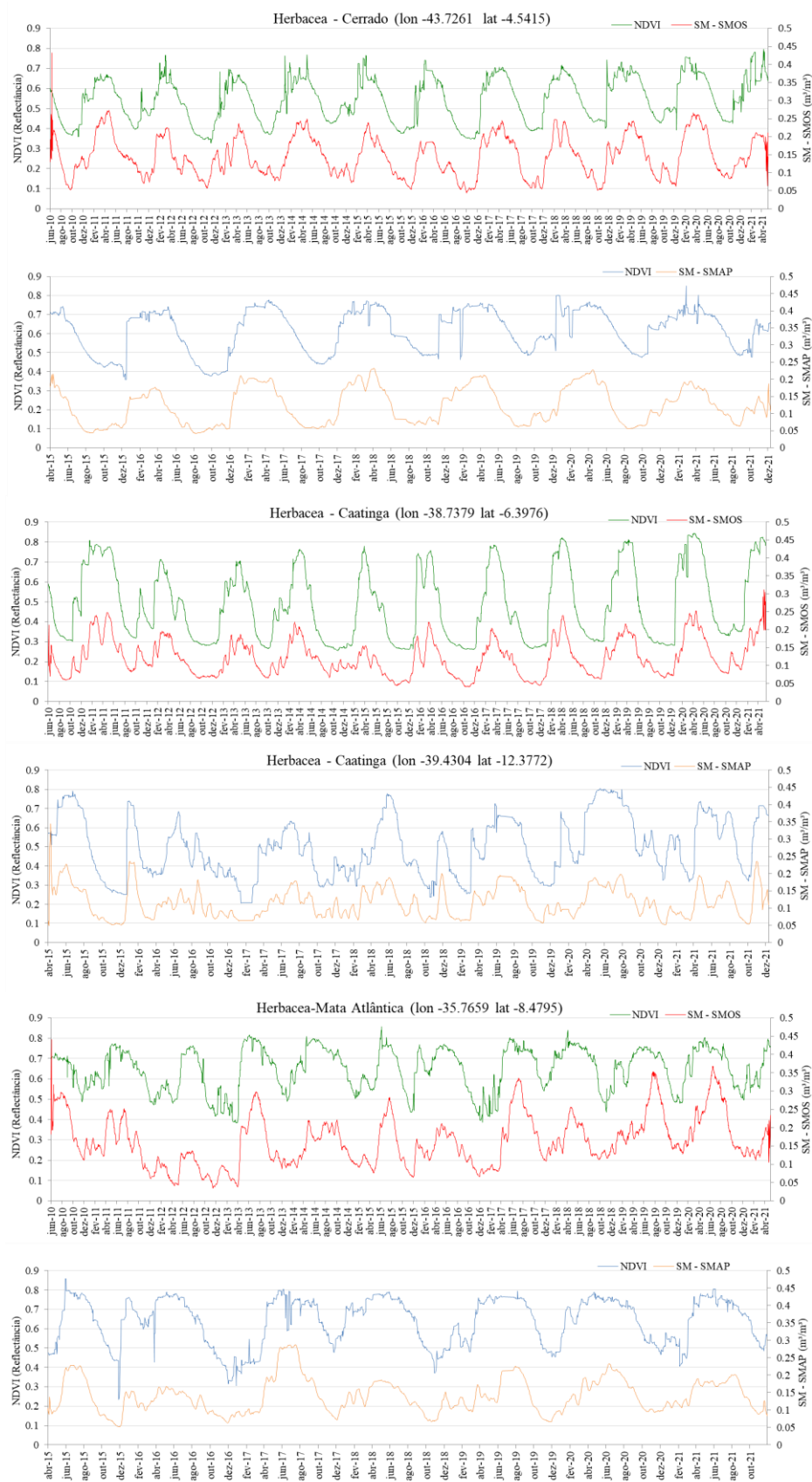


Figura 4.4: Gráficos representando a relação entre a unidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas herbáceas dos três biomas: melhores correlações.

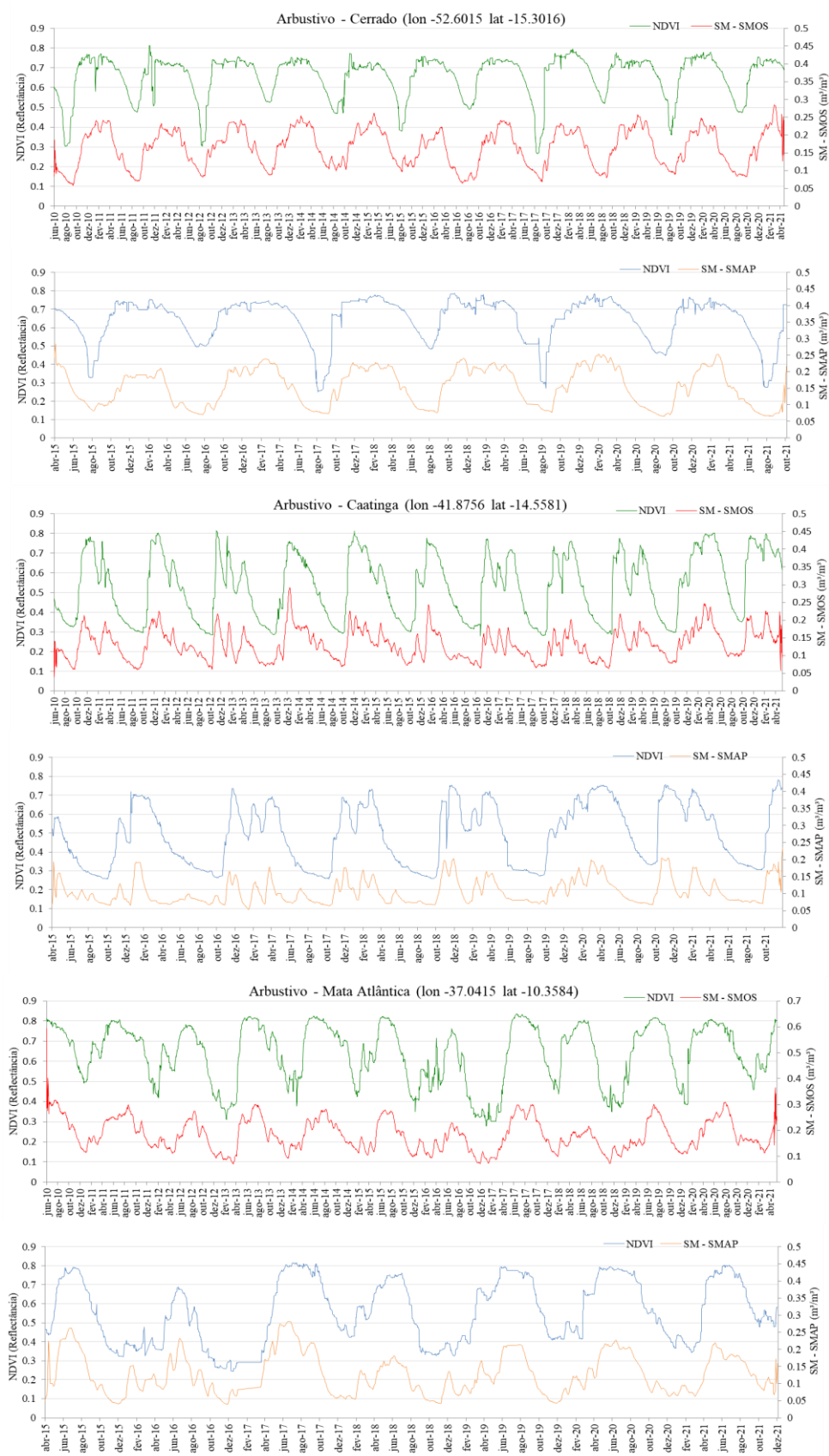


Figura 4.5: Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas arbustivas dos três biomas: melhores correlações.

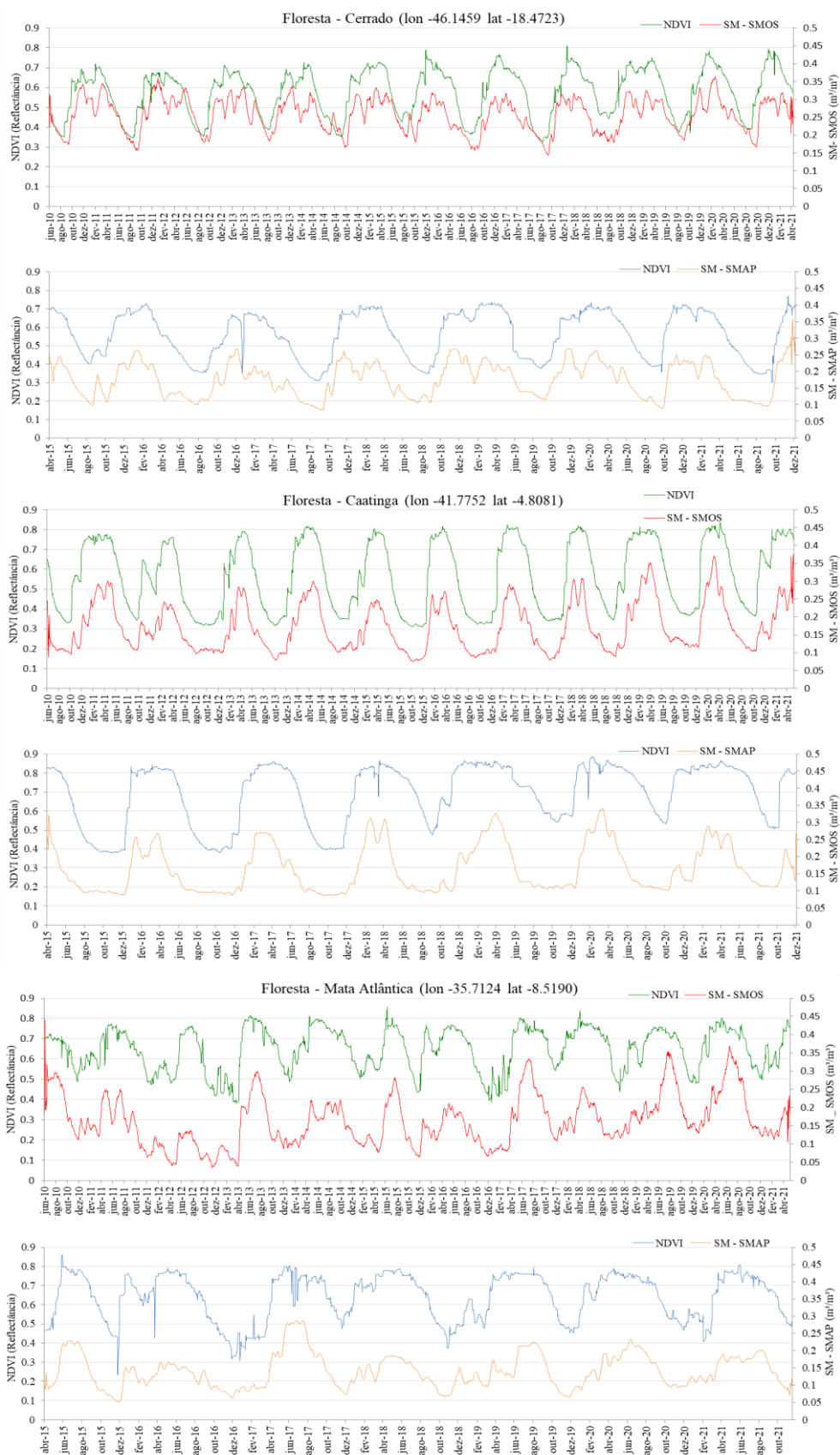


Figura 4.6: Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de coberturas florestais dos três biomas: melhores correlações.

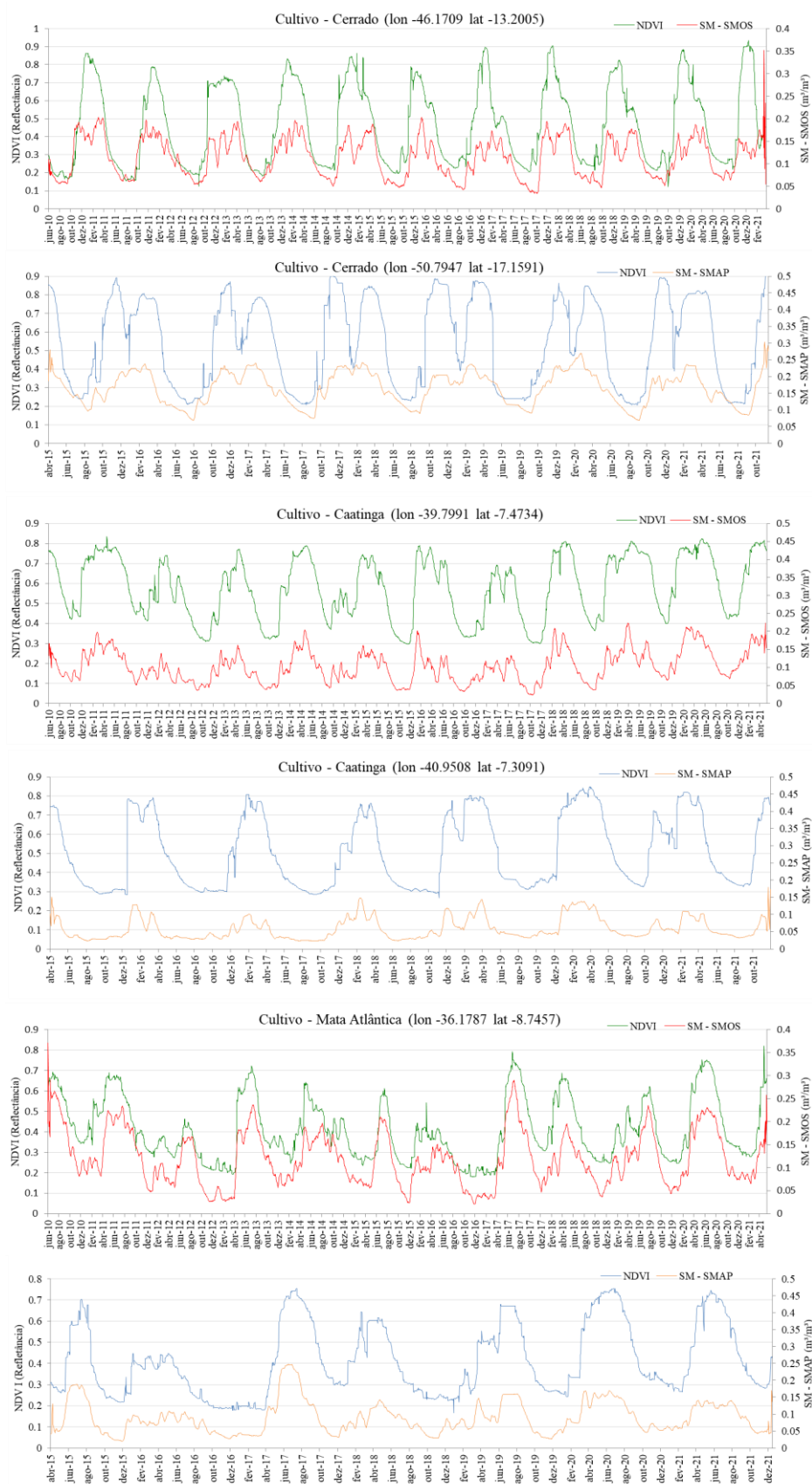


Figura 4.7: Gráficos representando a relação entre a umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI de áreas de cultivo dos três biomas: melhores correlações.

Já as coberturas herbáceas, arbustivas e florestais dos outros biomas (Cerrado e Mata Atlântica) apresentam curvas do NDVI mais atenuadas, o que indica que se adaptam melhor ao meio em que se encontram, se restringindo a umidade do solo, cujo vigor melhora gradativamente a partir do reestabelecimento gradativo da umidade no solo de acordo com o período mais úmido. As herbáceas de modo geral, apresenta maior variação no NDVI. Tendo em vista que é um tipo de cobertura que fica mais exposta às condições atmosféricas. Além disso, há de se considerar que é um tipo de cobertura que por seu porte, apresenta raízes mais curtas, e por isso pode variar concomitantemente com a umidade do solo superficial que é registrada pelos sensores (que pode ou não ser a mesma da zona raiz).

De acordo com [Souza \(2019\)](#), a umidade do solo na superfície pode apresentar grande variação e dependências do ambiente predominante, uma vez que o solo ganha ou perde diretamente a umidade, devido à chuva ou evaporação. [Araújo et al. \(2018\)](#) consideram que a cobertura do solo em particular tem um efeito significativo na distribuição de água e a textura do solo é um fator determinante na dinâmica de movimentação, distribuição e armazenamento da água.

Também vale considerar o volume máximo de água disponível para as plantas, que é a capacidade de campo menos o ponto de murcha. Segundo [Seneviratne et al. \(2010\)](#), acima da capacidade de campo a água não poderia ser retirada contra a drenagem gravitacional, e abaixo do ponto de murcha, a água é retida fortemente pela matriz do solo, não sendo acessível às plantas. Os autores afirmam que a capacidade de campo e o ponto de murcha dependem das propriedades do solo, como a textura e do tipo de vegetação, para considerar o ponto de murcha, e são informações que variam geograficamente.

4.3.2 O tempo de resposta da vegetação

Os gráficos das Figuras 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, representam a curva de correlação que corresponde aos resultados das correlações obtidos a partir do tempo de resposta da vegetação à umidade do solo (decalagem). Os gráficos são apresentados por tipo de cobertura e bioma (são três pontos em cada gráfico), a fim de identificar um período padrão de resposta da vegetação por tipo de cobertura, considerando os modelos gerados para o SMOS e SMAP (que assemelham entre si).

Em tons de verde, é apresentado os gráficos das correlações do satélite SMOS, e em tons de azul, as correlações do satélite SMAP. A esquerda (nos gráficos) é apresentado os

valores das correlações e paralelo, a quantidade de iterações definidas no processamento, identificando o melhor dia/período de resposta do NDVI em relação a umidade do solo, ou seja, o melhor dia de melhor correlação.

O tempo de atraso de resposta da vegetação (decalagem) variou muito para um mesmo tipo de cobertura, não sendo possível observar também um padrão entre as estimativas dos dois satélites. Essa variação pode ser devida as características locais. Dessa forma, os resultados da decalagem apresentados na Tabela 4.1 condiz aos valores mínimos e máximos considerando cada tipo de cobertura e bioma para os dois satélites depois de tabelados os dados.

Os estudos que comparam o NDVI com a umidade do solo com o intuito de identificar o tempo de resposta da vegetação, analisaram uma área específica e no geral apresentam uma relação mais definida, e como este estudo considera pontos localizados em regiões distintas do país, é normal que não haja um padrão na decalagem entre umidade do solo e coberturas vegetais de um mesmo tipo, pois as condições ambientais não são as mesmas.

Observa que para coberturas da Caatinga e de herbáceas, as melhores correlações são obtidas na faixa de 15 dias, ou seja, a melhora do vigor ocorre em torno de 15 dias após os primeiros indícios de umidade do solo. Um modelo de curva mais acentuado nesses pontos sugere adaptação gradativa da planta com a umidade do solo, até atingir o ponto de maior inflexão (melhor vigor, mesmo que gradativo).

Desta forma, considerando a existência de umidade do solo no dia 0, o dia 15 representa o ápice do vigor da planta em função desse dia, e se no dia 1, cessa a umidade do solo (ausência de chuva, irrigação, ou aumento da evapotranspiração), no dia 16, o índice da vegetação calculado já é menor pois a planta começa a entrar no modo escassez, voltando ao seu modo adaptativo (período de pouca ou sem umidade disponível). Portanto, o vigor da planta deve se estender por mais dias quando a umidade do solo se fazer presente de forma mais constante, e com isso haverá pouca alteração no NDVI. Já para regiões de períodos secos mais prolongados, qualquer presença de umidade do solo, torna mais perceptível as alterações no NDVI e no tempo de resposta.

Também foi observado em outros modelos de gráficos um outro padrão de curva de correlação onde é identificado uma boa relação entre o NDVI e a umidade do solo desde os primeiros dias (primeiras iterações). Para esses pontos, infere-se que essas coberturas passam por eventuais processos de estresse hídrico ou podem estar adaptadas ao ambiente que facilita essa interação no sistema solo-planta-água-atmosfera. Geralmente esses valores se mantêm constantes até indicar uma leve queda no vigor da vegetação. Esses padrões não estão

associados à algum eventual tipo de cobertura ou bioma, a depender também das condições atmosféricas (de umidade). De certo modo, haverá uma resposta maior do NDVI em relação a umidade do solo quando a vegetação estiver passando por algum processo de estresse hídrico, e por isso tende a apresentar melhores correlações, uma vez que a vegetação se torna refém da umidade.

Segundo Wang *et al.* (2007), a média da umidade do solo da zona raiz segue um padrão de sazonalidade forçada pela média do clima local e pelos ciclos de vida da vegetação e que por isso a variação das condições climáticas em várias escalas temporais, resultam no desvio temporal da umidade do solo e das condições médias ao longo prazo. E que esse desvio de umidade do solo de sua condição média, afeta a vegetação e causa mudanças em suas características (seja pela condição da folha, ou pela cobertura da superfície).

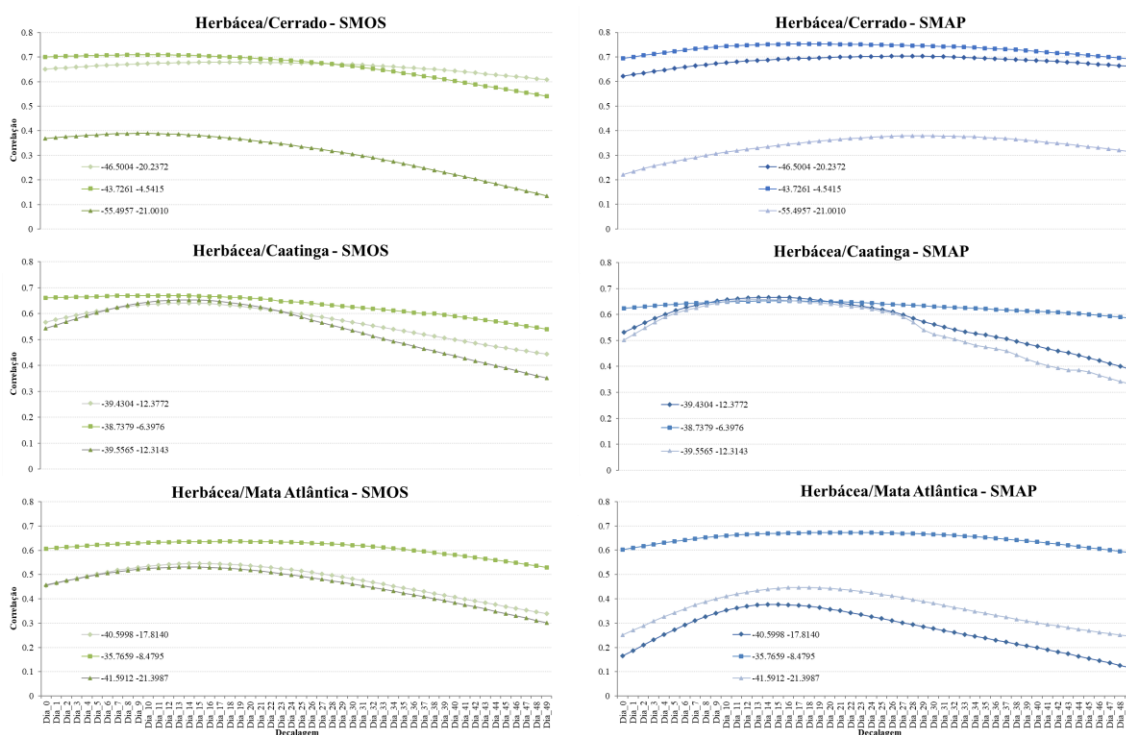


Figura 4.8: Gráficos das correlações e decalagem das coberturas herbáceas a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas.

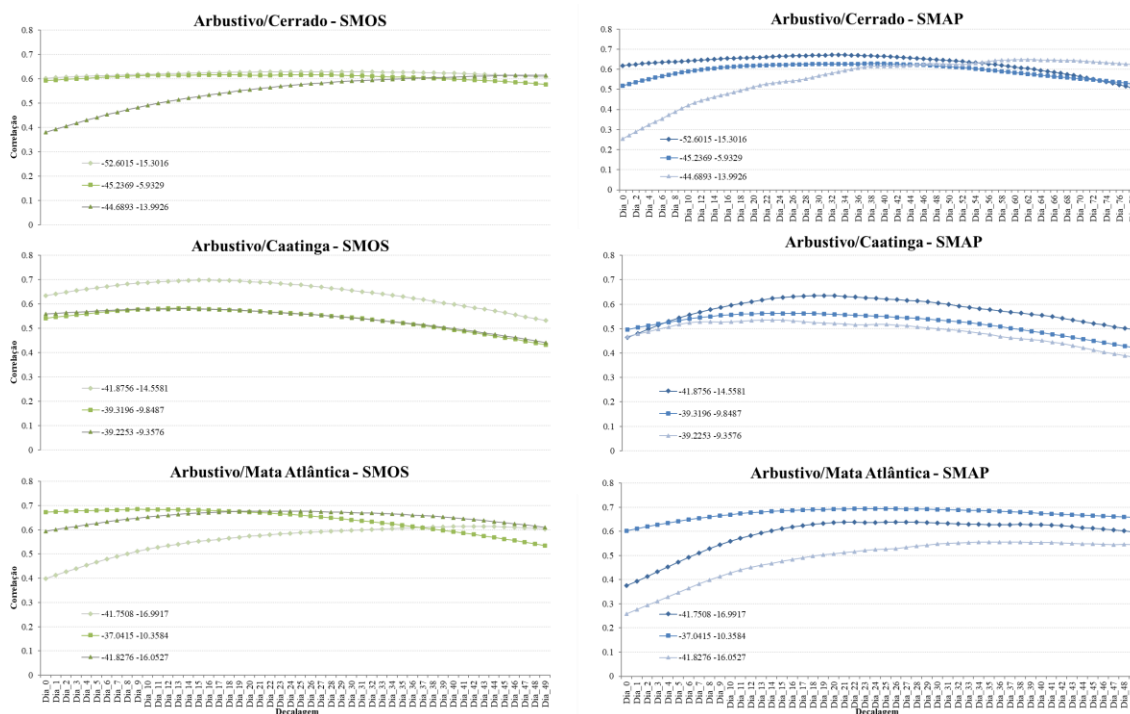


Figura 4.9: Gráficos das correlações e decalagem das coberturas arbustivas a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas.

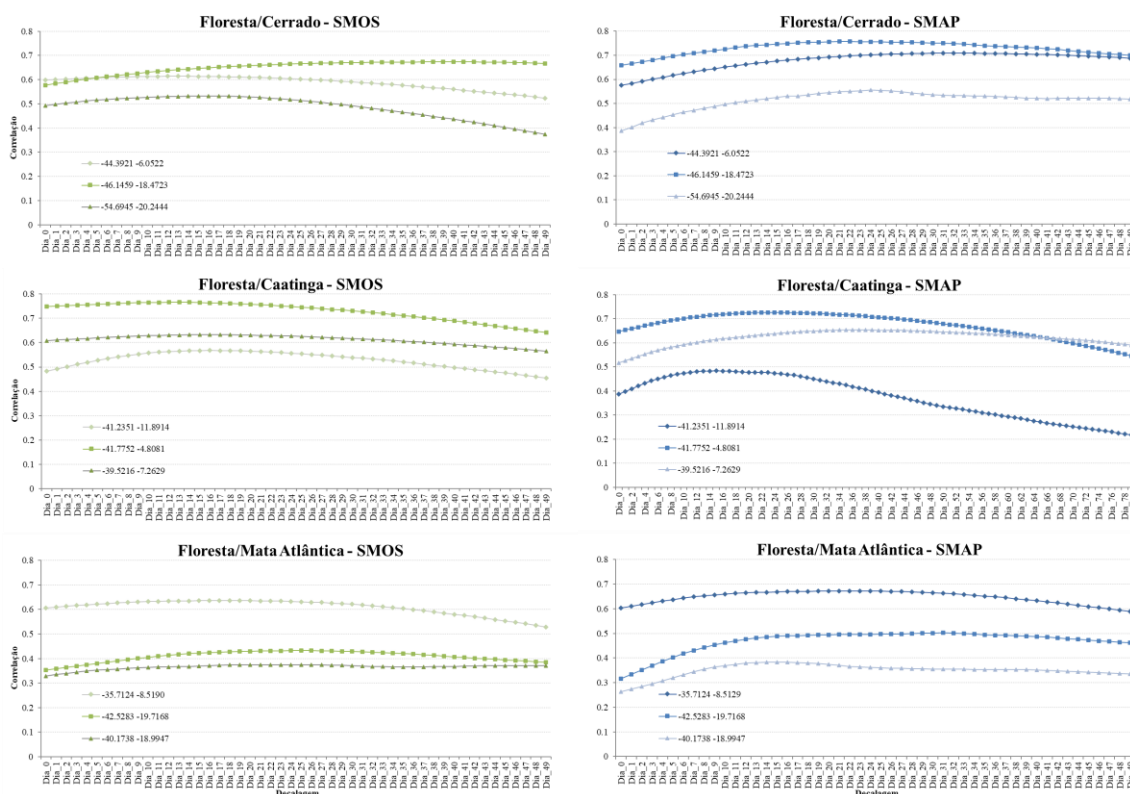


Figura 4.10: Gráficos das correlações e decalagem das coberturas florestais a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas.

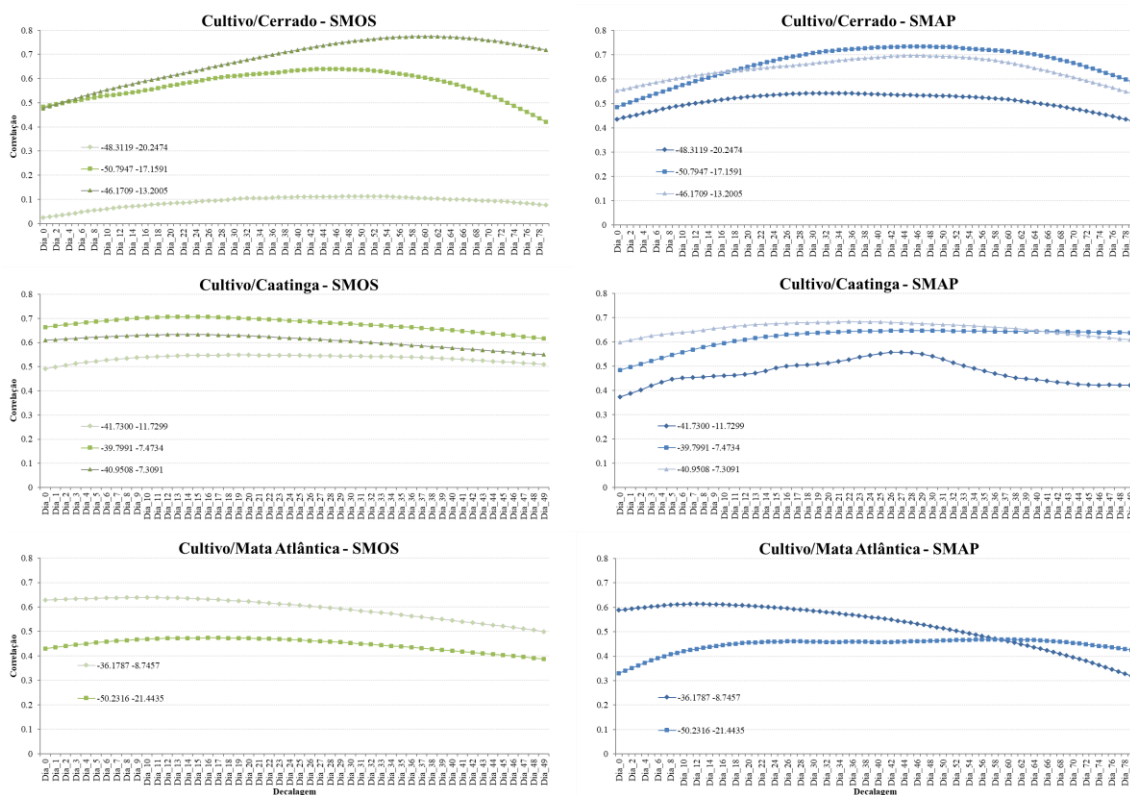


Figura 4.11: Gráficos das correlações e decalagem de áreas de cultivo a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI para os três biomas.

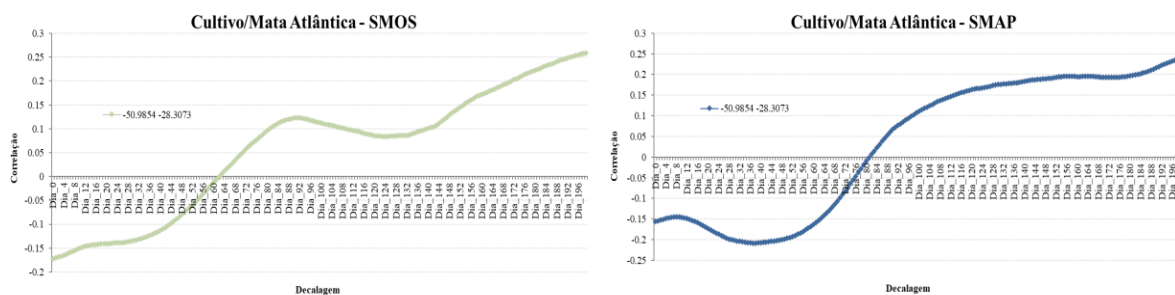


Figura 4.12: Gráficos das correlações e decalagem de uma área de cultivo do bioma Mata Atlântica a partir da estimativa da umidade do solo SMOS e SMAP e o NDVI.

Wang *et al.* (2007) afirmam que dentro de um ecossistema, há um autoajuste da densidade espacial da vegetação para coincidir com a condição climática local e a disponibilidade de água. No caso de um ecossistema natural, a vegetação pode desenvolver um certo equilíbrio dentro de uma condição climática local, tornando a umidade do solo da zona raiz, semelhante a zona de gradiente climático.

De acordo com Wang *et al.* (2007), em áreas com vegetação, a umidade de solo na zona raiz funciona como um elo entre a fenologia e o armazenamento de água no subsolo e influencia fortemente o equilíbrio da água superficial e a partição de energia devido a evapotranspiração.

Também controla as condições de saúde e cobertura da vegetação de superfície, principalmente em áreas áridas e semiáridas, onde a água se torna um dos principais fatores de controle para o crescimento da vegetação. Portanto, a densidade e o estado da vegetação obedecem ao clima local e às propriedades do solo que controlam a disponibilidade da água.

Por fim, mapear a umidade do solo da zona raiz (sistema radicular) é tido como um desafio porque a relação entre NDVI e a umidade do solo depende das espécies de vegetação e zonas climáticas, mas segundo Wang *et al.* (2007), uma vez que o NDVI é significativamente correlacionado com a umidade do solo, o NDVI derivado de sensores ópticos pode fornecer um bom substituto para o mapeamento da umidade do solo da zona da raiz em grande escala. Em todos os casos observados, o fator determinante é a umidade que chega, já a forma com que essa umidade é distribuída e o tempo que ela permanece disponível para a planta, depende de outros fatores.

4.4 Análise das características ambientais

Com base nos resultados e análises anteriores, foi feito um mapeamento considerando algumas características físicas e ambientais importantes relacionadas ao relevo, vegetação e tipo de solos. Este mapeamento encontra-se resumido na tabela do Apêndice A, considerando cada um dos pontos. Também é apresentado um mapa de classificação dos solos na Figura A.1 conforme as classes do solo definidas pelo IBGE. Considerando que são 36 pontos distribuídos aleatoriamente em regiões do Brasil, não seria possível o mapeamento de campo, por isso este mapeamento foi feito considerando os arquivos *shapefiles* disponibilizados pelo IBGE os quais continham algumas dessas informações.

Esta seção é uma base para explicar as variações encontradas nos resultados uma vez que um mesmo tipo de cobertura, com gradiente climático semelhante apresentaram relações diferentes entre umidade do solo e NDVI. Portanto, o objetivo não é esmiuçar tais características, mas entender que dado os diferentes contextos geográficos no Brasil, as variações observadas nos resultados obtidos permeiam por meio destes contextos, por isso foi considerado útil tal avaliação. Os gráficos da Figura 4.13 representam os pontos que apresentaram correlações baixas (apresentados em sequência conforme a Tabela 4.1). Os pontos em que foi observado baixas correlações são um exemplo de como a presença de umidade do solo não é sinônimo de disponibilidade de água para as plantas, e que esse acesso depende de como o ambiente físico favorece a extração de água pelas raízes.

Observando estes gráficos e de acordo com o que foi mapeado segundo o IBGE, esses pontos no geral se encontram em regiões de relevo mais acidentado, geralmente em áreas de planaltos, com relevo dissecado, com topos convexos ou tabulares, áreas de colinas ou morros costeiros. Os solos desses pontos apresentam textura média a argilosa ou muito argilosa. As classificações florestais, arbustivas e de cultivo foram de acordo com o mapeamento do IBGE, ou seja, não houve nenhuma discrepância entre a classificação inicial realizada em ambiente GIS quanto ao tipo de cobertura e o mapeamento do IBGE feito posteriormente. No entanto, as áreas herbáceas que apresentaram baixas correlações nos três biomas constavam no mapeamento do IBGE uso antrópico dominante, com áreas de pastagens, e isso pode ter impactado na relação entre o NDVI e a umidade do solo e explica a variação dos resultados encontrados para essa mesma espécie de cobertura.

De acordo com o [IBGE \(2015\)](#), nos solos do grupamento textural "média", a plasticidade e a pegajosidade condicionadas pela presença de argila, perdem expressão em detrimento da sensação de atrito determinada pela fração areia e pela sedosidade determinada pela fração silte. As classes argilosas possuem variações associadas à plasticidade e pegajosidade tanto em função do teor, quanto ao tipo de mineral de argila predominante. Todos são plásticos e pegajosos e podem ser muito plásticos e muito pegajosos quando com presença significativa de argilas expansivas (argilas de alta atividade).

De modo geral, de acordo com [Liu et al. \(2012\)](#), solos com alto teor de argila podem reter mais água do que solos com baixo teor de argila e que com a mesma quantidade de precipitação, solos com maior teor de argila podem reter mais água do que aqueles com maior teor de areia. No entanto, afirmam que o conteúdo de água no solo não é igual ao conteúdo de água disponível no solo para as plantas e embora o solo argiloso possa reter mais água do que o solo arenoso, as moléculas de água nos solos argilosos também estão fortemente ligadas às partículas de argila e são difíceis de extrair pelas plantas.

Segundo [Liu et al. \(2012\)](#), a umidade do solo pode variar bastante dentro de uma pequena área e que também é influenciada pela topografia. Os solos na encosta geralmente retêm menos água do que os solos de vale por causa do maior fluxo lateral. De acordo com [Novais \(2021\)](#), a variação da umidade do solo remete ao processo de pedogênese e depende da interação dos fatores de formação dos solos, como o clima, a ação biológica, posição topográfica, tipo de rocha matriz e o tempo.

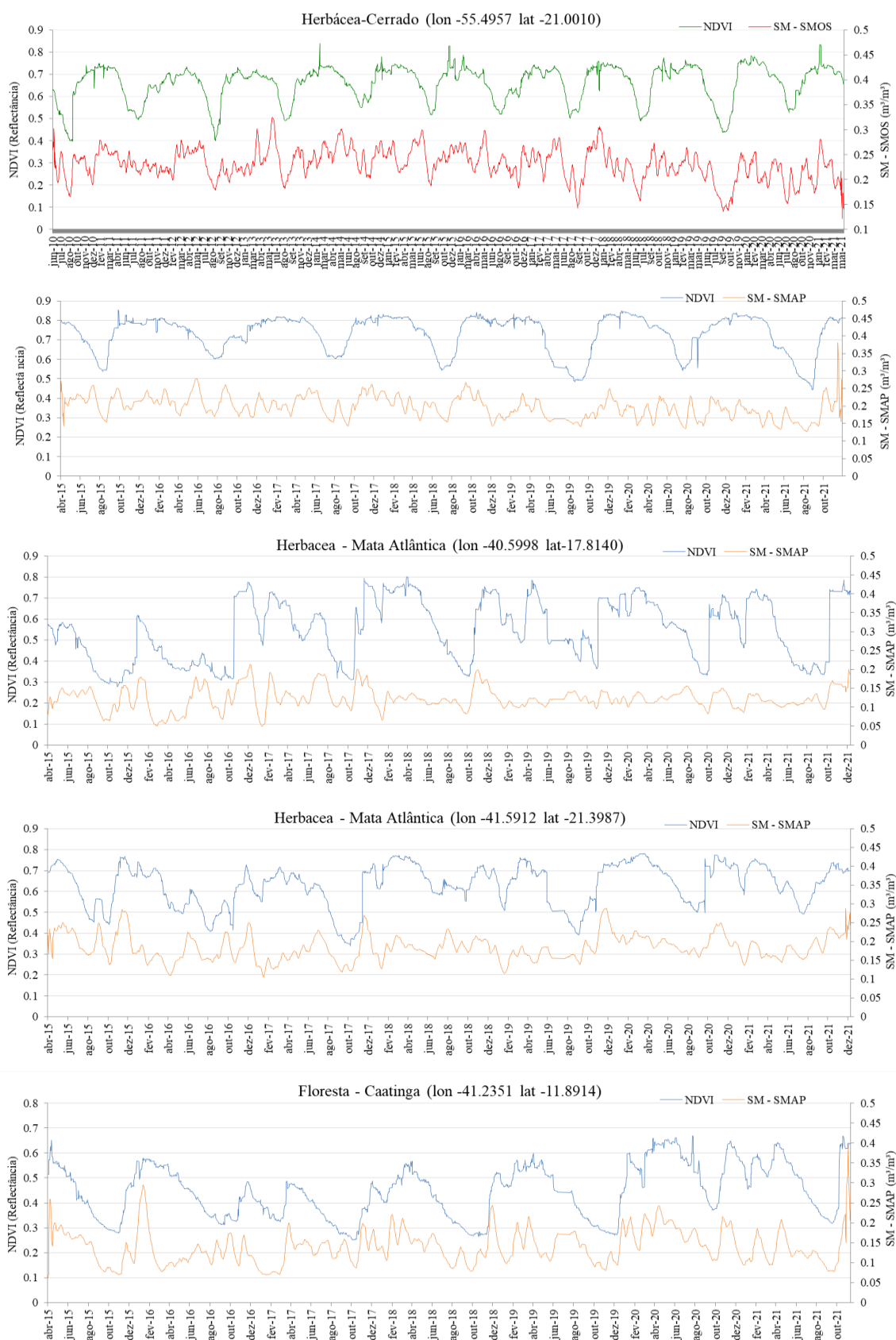


Figura 4.13: Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI.

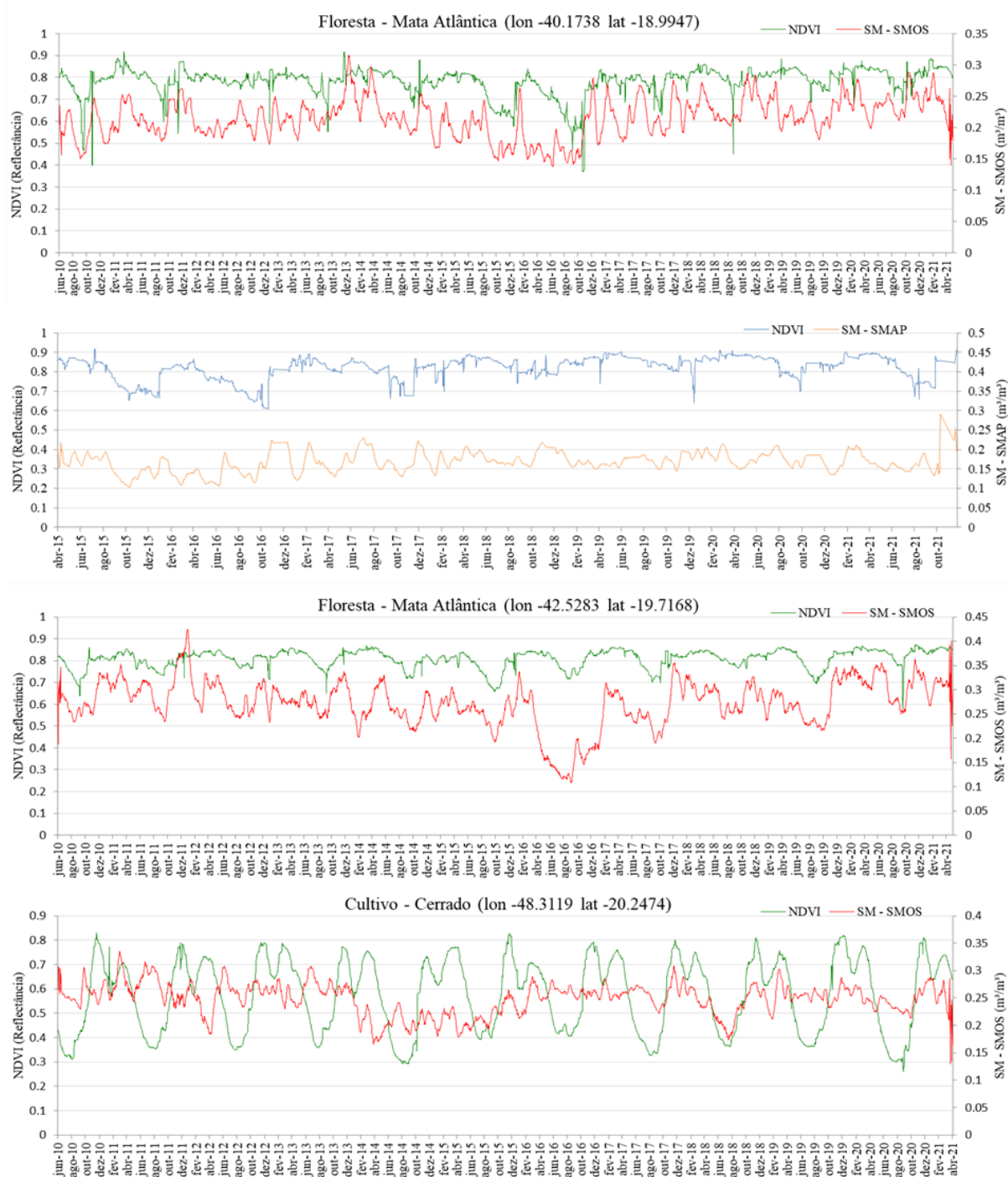


Figura 4.13: (continuação) Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI.

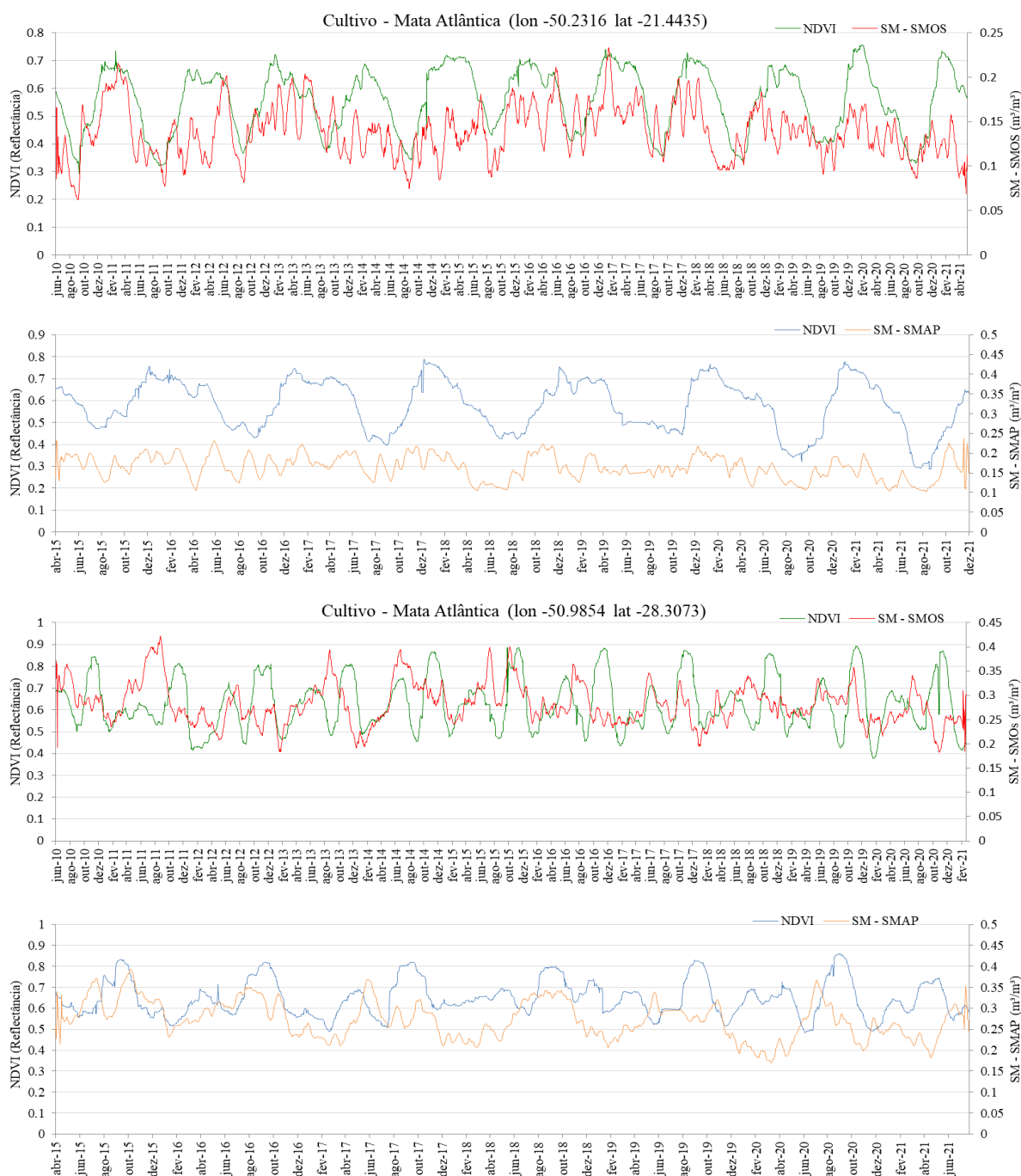


Figura 4.13: (continuação) Gráficos que representam as correlações mais baixas obtidas entre as estimativas dos satélites SMOS e SMAP e o NDVI.

Novais (2021) afirma que os solos são capazes de reter água durante certo período a depender dos seus atributos e propriedades. Quando saturado, o solo abastece gradativamente a atmosfera por meio da evapotranspiração, e o lençol freático pela percolação da água no perfil. O autor observa que os atributos do solo e as condições de uso e ocupação apresentam relação direta com a capacidade de retenção ou da disponibilização dessa água ao longo de um período.

Os dois últimos gráficos apresentados classificados como cultivo no bioma da Mata Atlântica que apresentaram as correlações mais baixas, são de áreas mapeadas pelo IBGE como agricultura com culturas cíclicas, permanentes e pastagens. Analisando esses gráficos, os picos de NDVI e umidade do solo alterna-se entre si, sem padrão definido. Considerando que os dois produtos de umidade de solo, tanto SMOS quanto SMAP, apresentaram o mesmo padrão de correlação (4.12), infere-se que o período de maior umidade do solo não corresponde ao ciclo de crescimento da planta, que varia conforme o tipo de cultura, uma vez que é observado flutuações sazonais tanto de umidade do solo quanto do NDVI, porém descorrelacionados.

De modo geral, considerando que as áreas de cultivo e as áreas de herbáceas (compostas de pastagens conforme o levantamento) tenderam a apresentar correlações menores, torna evidente que a análise da umidade do solo por meio do NDVI de vegetações não nativas, é um pouco mais complexa. E para entender como seria o tempo de atraso de resposta de áreas com presença de agricultura ou pastagens, talvez seja necessário um trabalho mais minucioso de campo, com detalhamento sobre a fenologia da planta. Por se tratar de culturas cíclicas (valendo considerar os períodos de plantio e colheita) ou até mesmo de diferentes culturas e intercalação de coberturas, e que para esta análise é computada a média de um pixel, seja de umidade do solo ou NDVI, os valores registrados dentro desse pixel podem sofrer alteração ao longo da série temporal, dificultando a relação entre essas duas variáveis.

4.5 Análise das médias mensais: umidade do solo, precipitação e evapotranspiração

De acordo com [Seneviratne *et al.* \(2010\)](#), as características da vegetação e de sua dinâmica ao longo do tempo, são imprescindíveis para as interações entre umidade do solo e a evapotranspiração. Além disso, os efeitos das mudanças na cobertura da terra ou na dinâmica da vegetação para o clima são frequentemente associados a modificações na umidade do solo, e as próprias mudanças na cobertura da vegetação podem ser devidas a mudanças nos regimes de umidade do solo.

Com base no que foi analisado na literatura e com intuito de entender como funciona o acoplamento entre as variáveis intimamente ligadas a umidade do solo: precipitação e evapotranspiração, esta seção consiste em apresentar como estas variáveis se correlacionam e se houve algum desacoplamento que possa ter impactado na distribuição da umidade do solo entre os 36 pontos analisados ao longo da série.

As Figuras 4.14a, 4.14b, 4.15a, 4.15b, 4.16a, 4.16b, 4.17a, 4.17b, 4.18a, 4.18b, 4.19a e 4.19b exemplificam esse acoplamento evidenciando as variações sazonais entre essas três

variáveis. O período considerado para esta análise é de 5 anos (abril de 2015 a abril de 2021), produzindo médias mensais de umidade do solo a partir dos dados diários obtidos para as análises anteriores. Os valores do coeficiente (R^2) para todos os pontos são apresentados na Tabela 4.1 (última coluna).

Observando os gráficos que apresentaram R^2 mais altos, os picos de umidade do solo tenderam acompanhar os períodos de maior volume de chuva. Altos para os períodos de maior precipitação, e baixos para períodos secos de pouca ou nenhuma precipitação. A evapotranspiração total também acompanha os picos de umidade do solo (também devido a maior precipitação), e tende a ser menor para os períodos com baixa umidade do solo, e maior quando há aumento da umidade. Há áreas, no entanto, em que o volume de precipitação diminui (como do ponto representado pela Figura 4.15a), e a umidade do solo também diminui, mas a taxa de evapotranspiração é maior.

Na Figura 4.15b observa-se que a evapotranspiração diminui nos períodos secos e mais frios. O mesmo acontece na Figura 4.16a, porém em alguns anos, a evapotranspiração tende a ser maior. Foi observado que altos volumes de precipitação para um determinado período, gera também picos mais altos de umidade do solo, porém quando o volume de chuva diminui ou passa a ser mais distribuída ao longo do período, os picos de umidade do solo diminuem ao passo que a evapotranspiração tende a se manter na proporção dos períodos de maior volume de chuva.

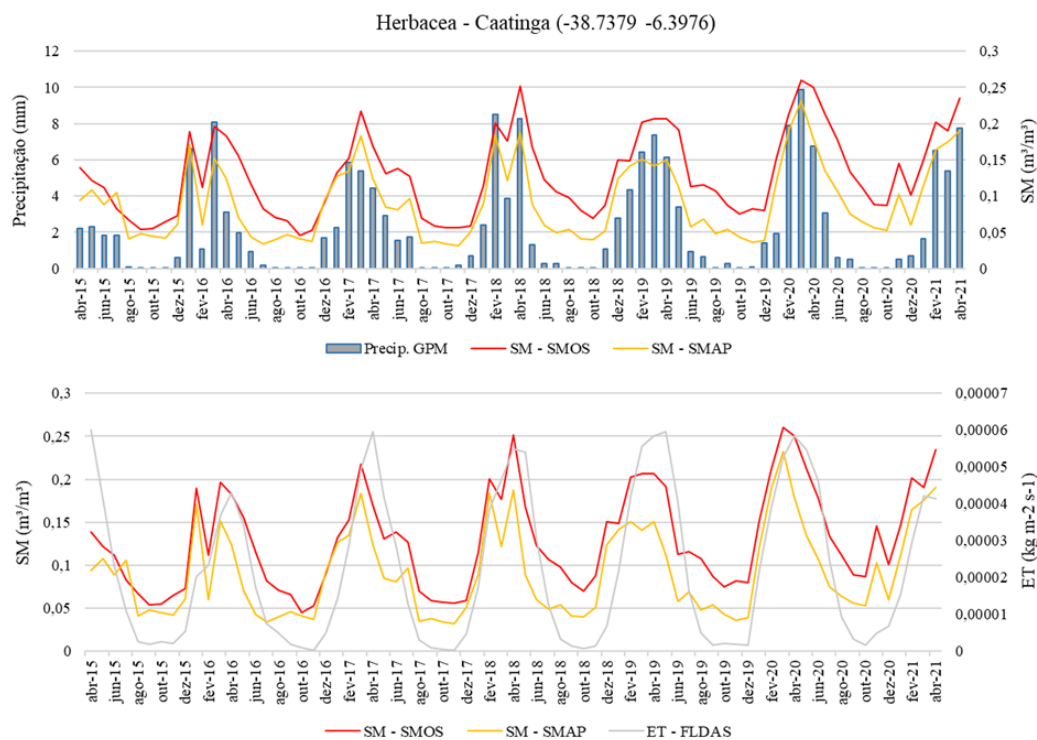
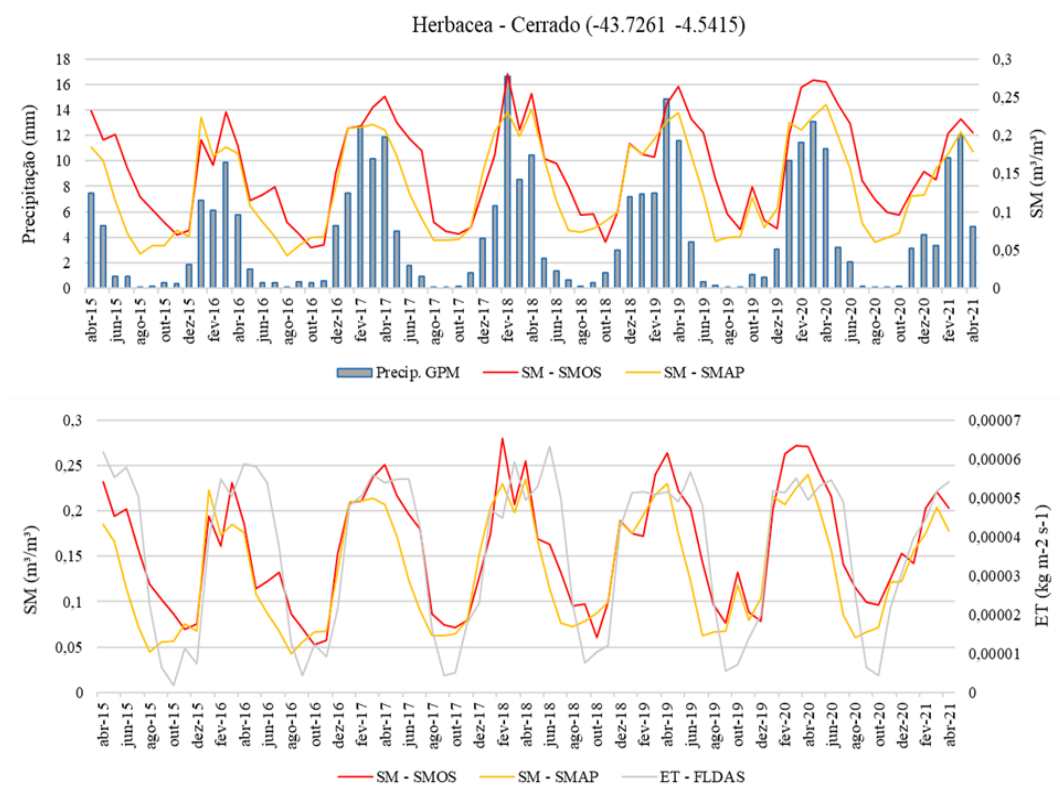


Figura 4.14: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para duas áreas de herbácea em dois biomas.

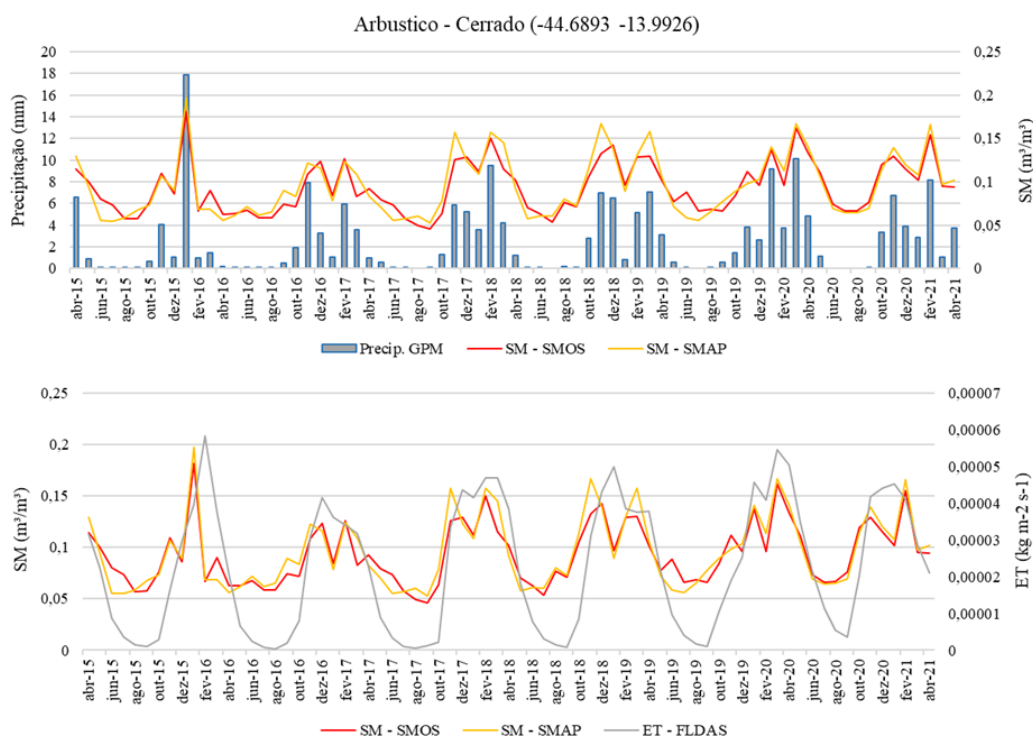
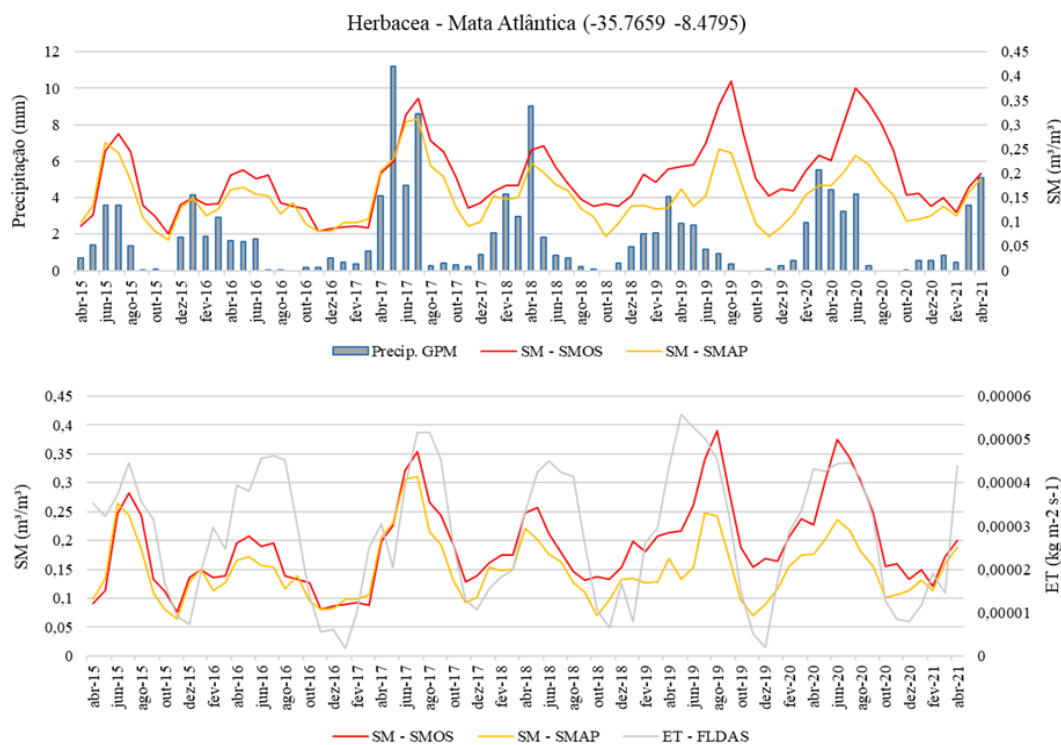


Figura 4.15: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de herbácea na Mata Atlântica e uma área arbustiva no Cerrado.

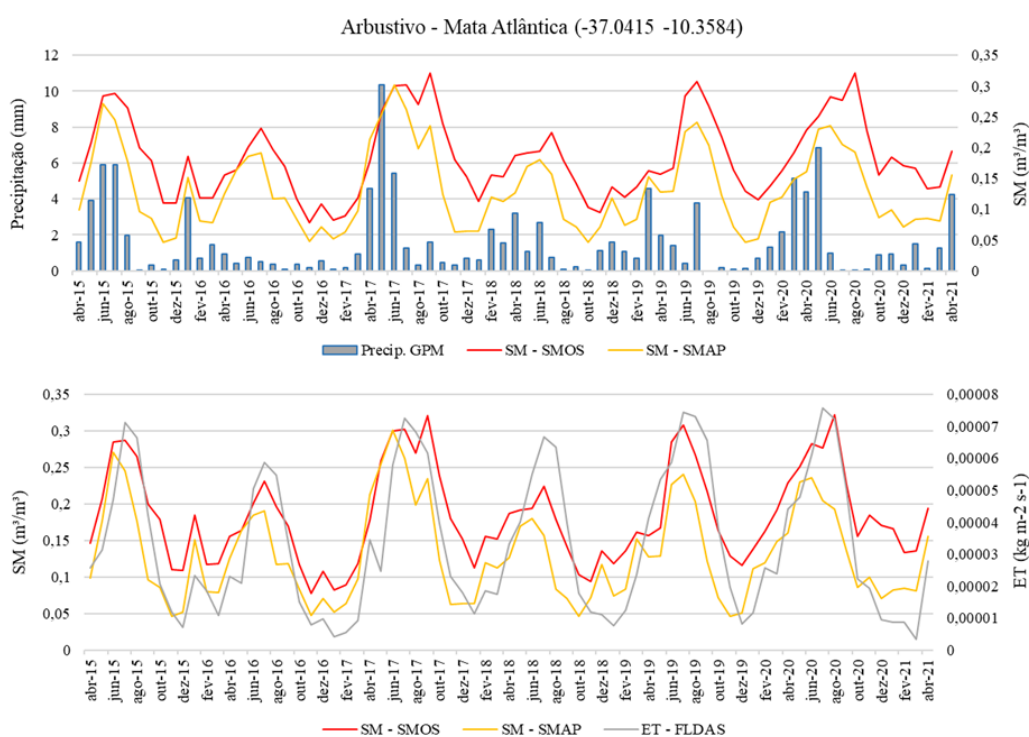
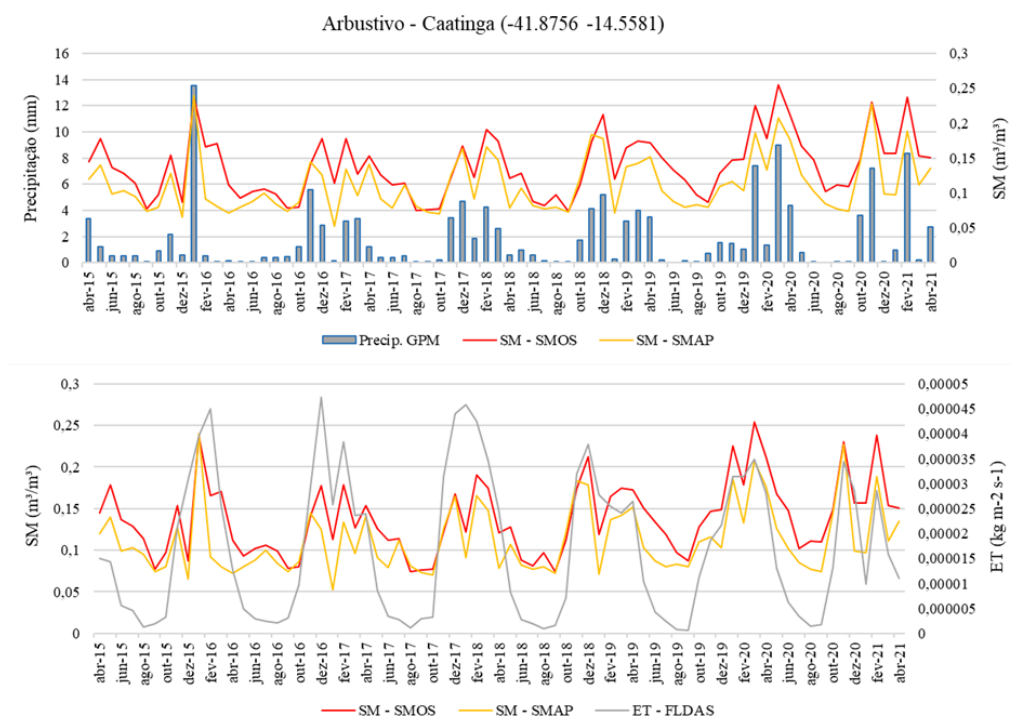


Figura 4.16: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área arbustiva na Caatinga e na Mata Atlântica.

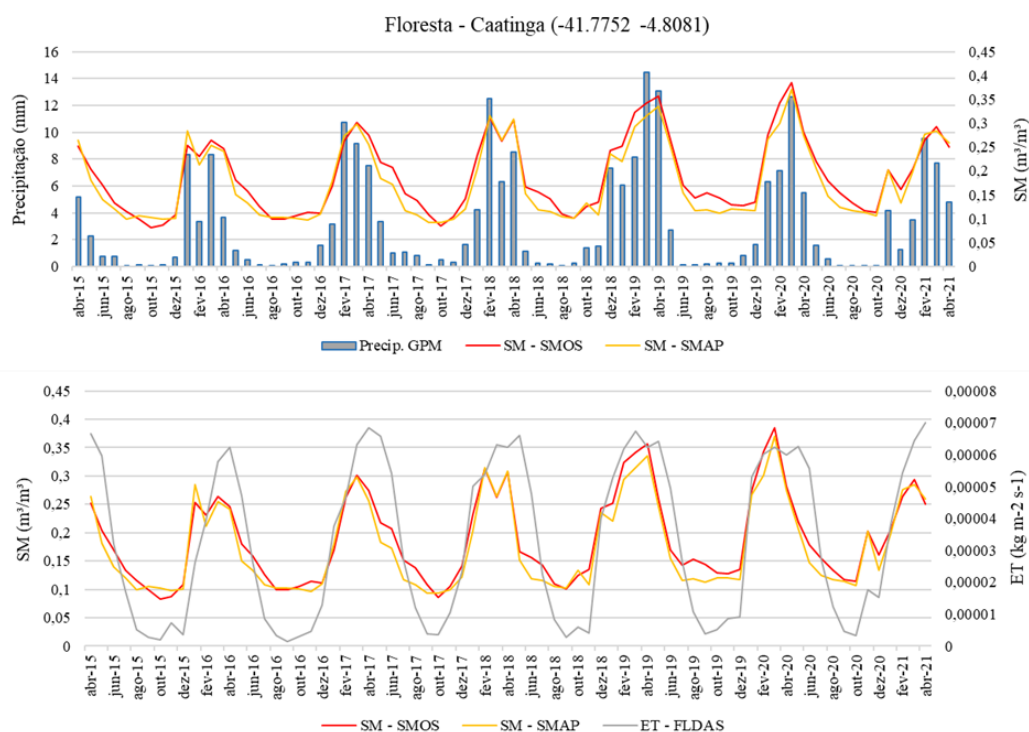
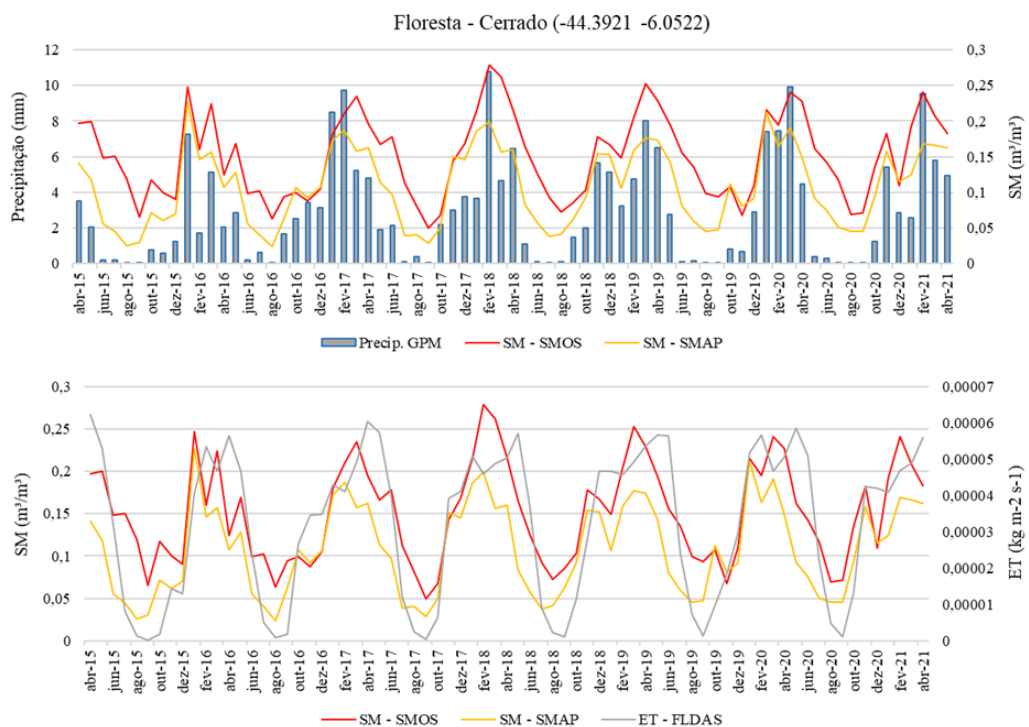


Figura 4.17: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de floresta no Cerrado e uma área de floresta na Caatinga.

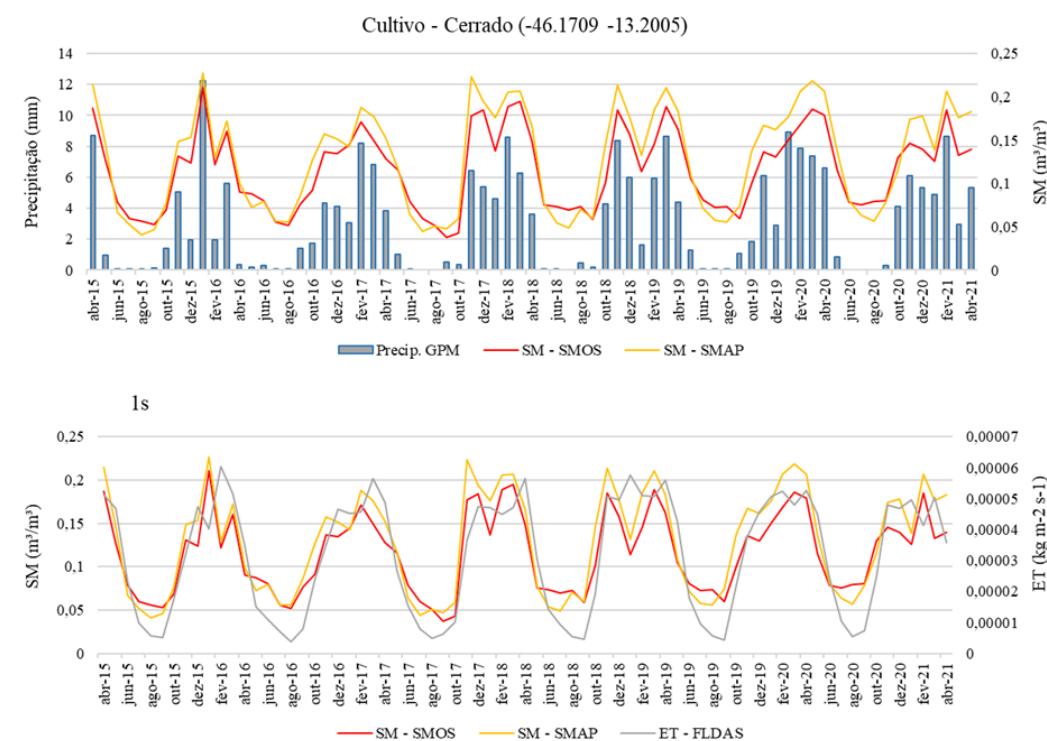
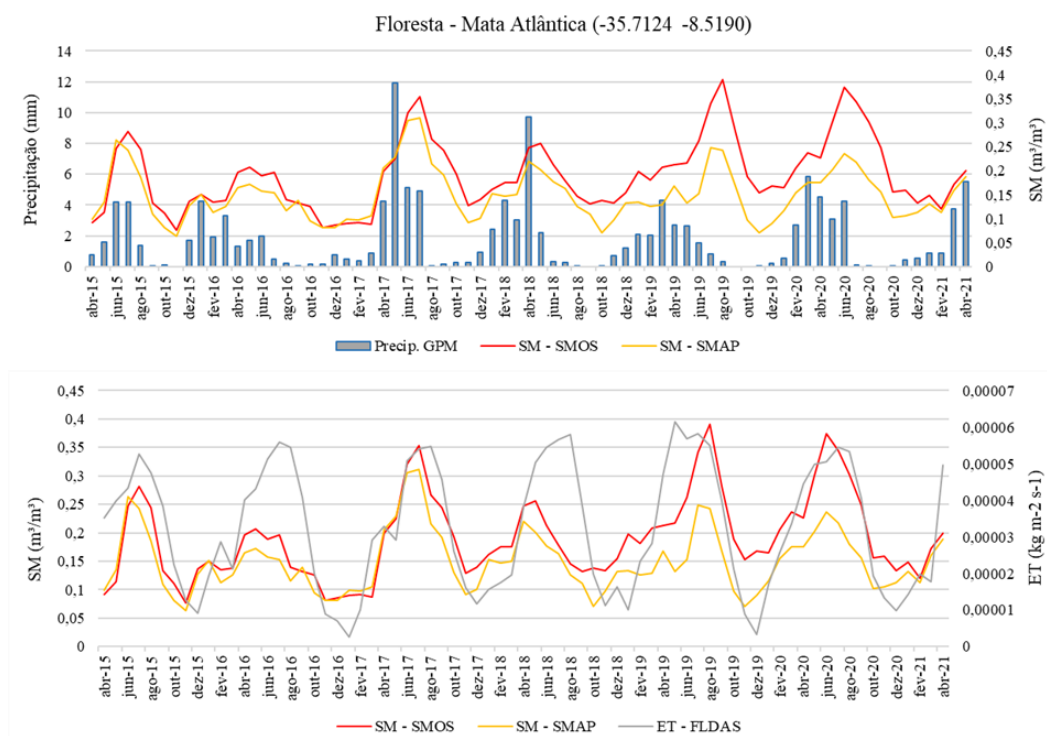


Figura 4.18: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de floresta na Mata Atlântica e uma área de cultivo no Cerrado.

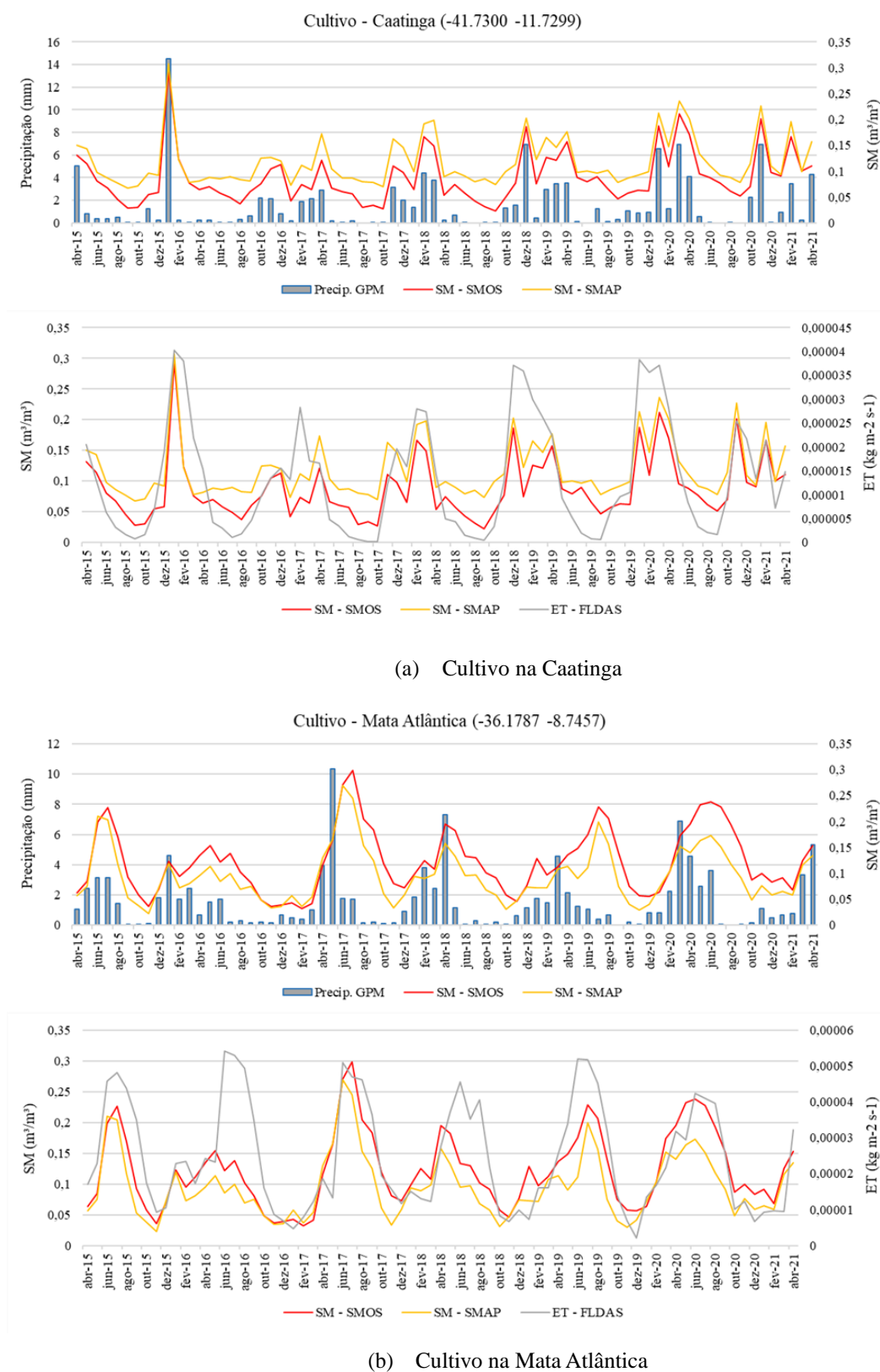


Figura 4.19: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de cultivo na Caatinga e na Mata Atlântica.

Para os pontos que houve baixas correlações e/ou baixos coeficientes de regressão, é observado se houve a presença de flutuações ao longo da série relacionadas a baixa precipitação ou alta evapotranspiração, que poderiam ocasionar variação da umidade do solo, ocasionando diminuição. Seguindo a tabela de resultados (Tabela 4.1), para a cobertura herbácea na região do Cerrado que apresentou correlação baixa para os dois satélites e coeficiente de regressão também menor, foi constatado que houve altos volumes de precipitação, porém pouca variação de umidade do solo. No caso dos eventos sazonais de chuva, foram acompanhados pelas taxas de evapotranspiração, sendo maior em períodos mais úmidos (elevação das temperaturas) e menor em períodos secos e mais frios (Figura 4.20). Nesse caso, os altos volumes de chuva tenderam mais ao escoamento que a infiltração, não favorecendo o acúmulo de água no subsolo.

Para as áreas de herbáceas na Caatinga em que houve baixos coeficientes de regressão, porém boas correlações para os produtos SMOS e SMAP com o NDVI, foi verificado que os picos de umidade do solo não acompanham em proporção os picos de volume de chuva, podendo ocorrer em períodos mais secos entre junho e agosto. É provável que nessas áreas possa haver alguns canais de irrigação, tendo em vista que foram classificadas pelo IBGE com presença antrópica dominante, o que explica os registros de umidade do solo sem o registro de precipitação. Já as taxas de evapotranspiração se associam às taxas de umidade do solo estimada, podendo ser maior em meses com maior volume de precipitação e menor para menores taxas de umidade do solo (Figura 4.21).

Nos dois pontos de herbácea da Mata Atlântica que apresentaram baixas correlações entre o produto SMAP e baixos coeficientes de regressão (Figura 4.22), a umidade do solo também não apresenta padrões de sazonalidade definidos. Há pouca alteração frente aos volumes de chuva, e as taxas de evapotranspiração seguem o padrão sazonal dos volumes de chuva se mantendo em proporção com as taxas de umidade do solo. Considera-se de modo geral, que o impacto da evapotranspiração na umidade do solo ocorreria se as taxas fossem inversamente proporcionais, ou seja, uma evapotranspiração maior, para um menor registro de umidade do solo.

Ainda seguindo a tabela, o ponto na área de floresta na Caatinga (Figura 4.23) de baixa correlação para o produto SMAP (com coeficiente de regressão também mais baixo), foi observado que as baixas taxas de umidade do solo se referem aos baixos volumes de chuva na região. As taxas de evapotranspiração, tendem a superar as taxas de umidade do solo entre final de 2018 e 2019, que pode implicar na diminuição da umidade do solo registrado nesse período.

Entre os anos de 2016 e 2017, ocorreram os menores eventos de chuva e taxas menores de umidade do solo e por isso, baixas taxas de evapotranspiração.

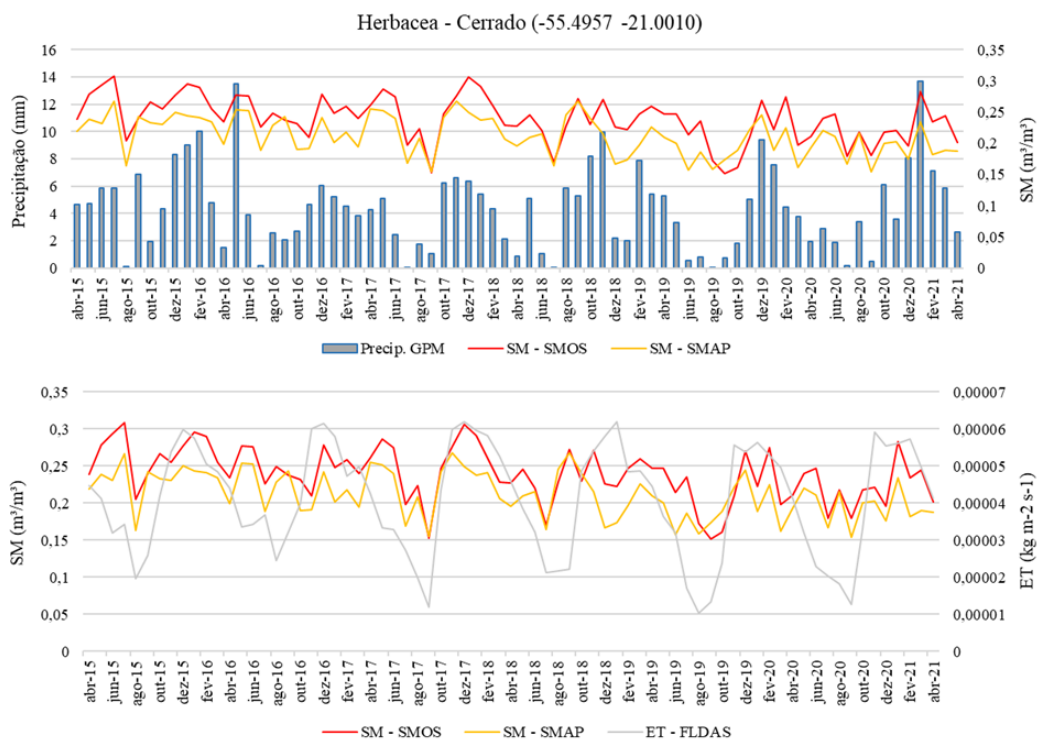


Figura 4.20: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de herbácea no Cerrado.

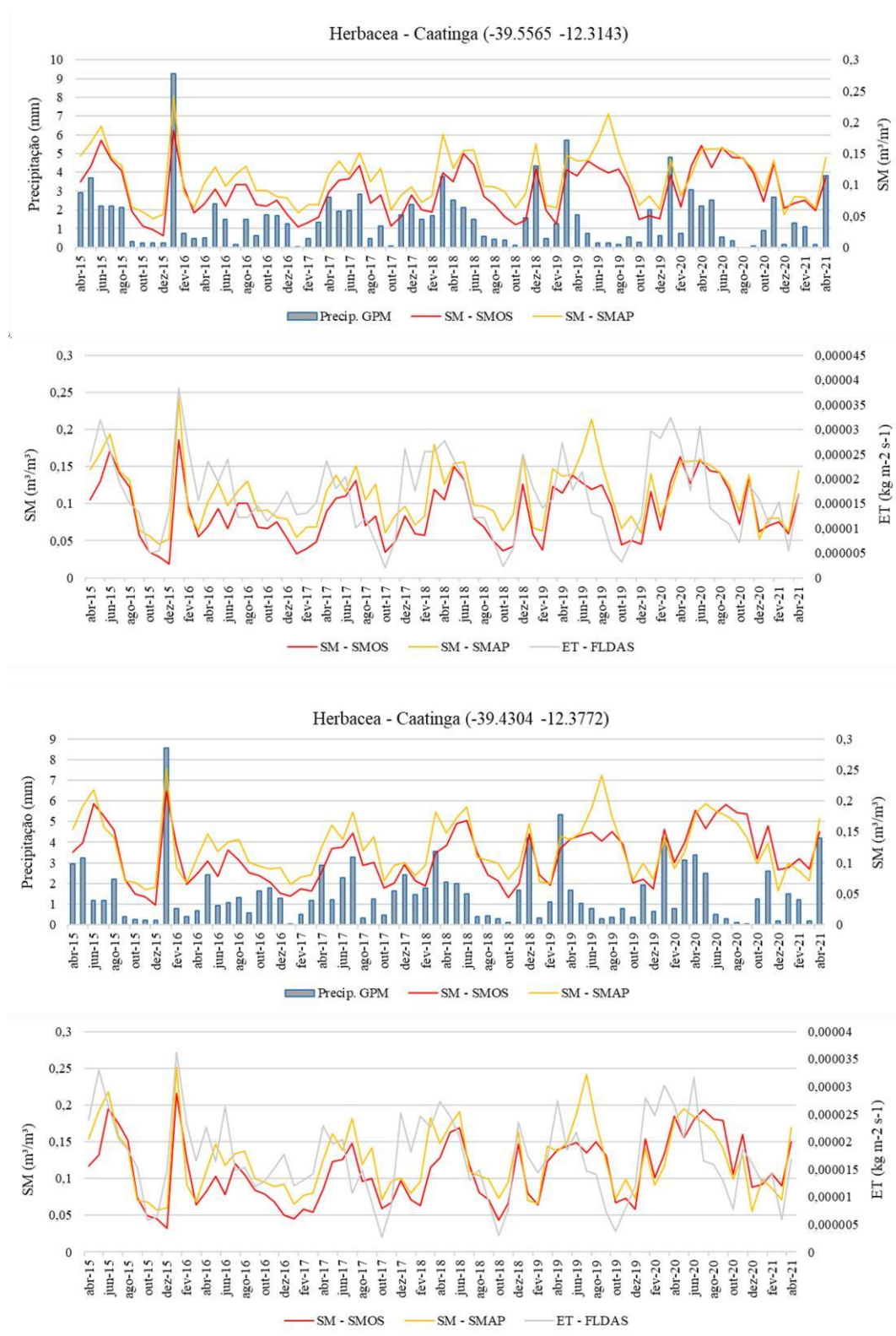


Figura 4.21: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas herbáceas na Caatinga.

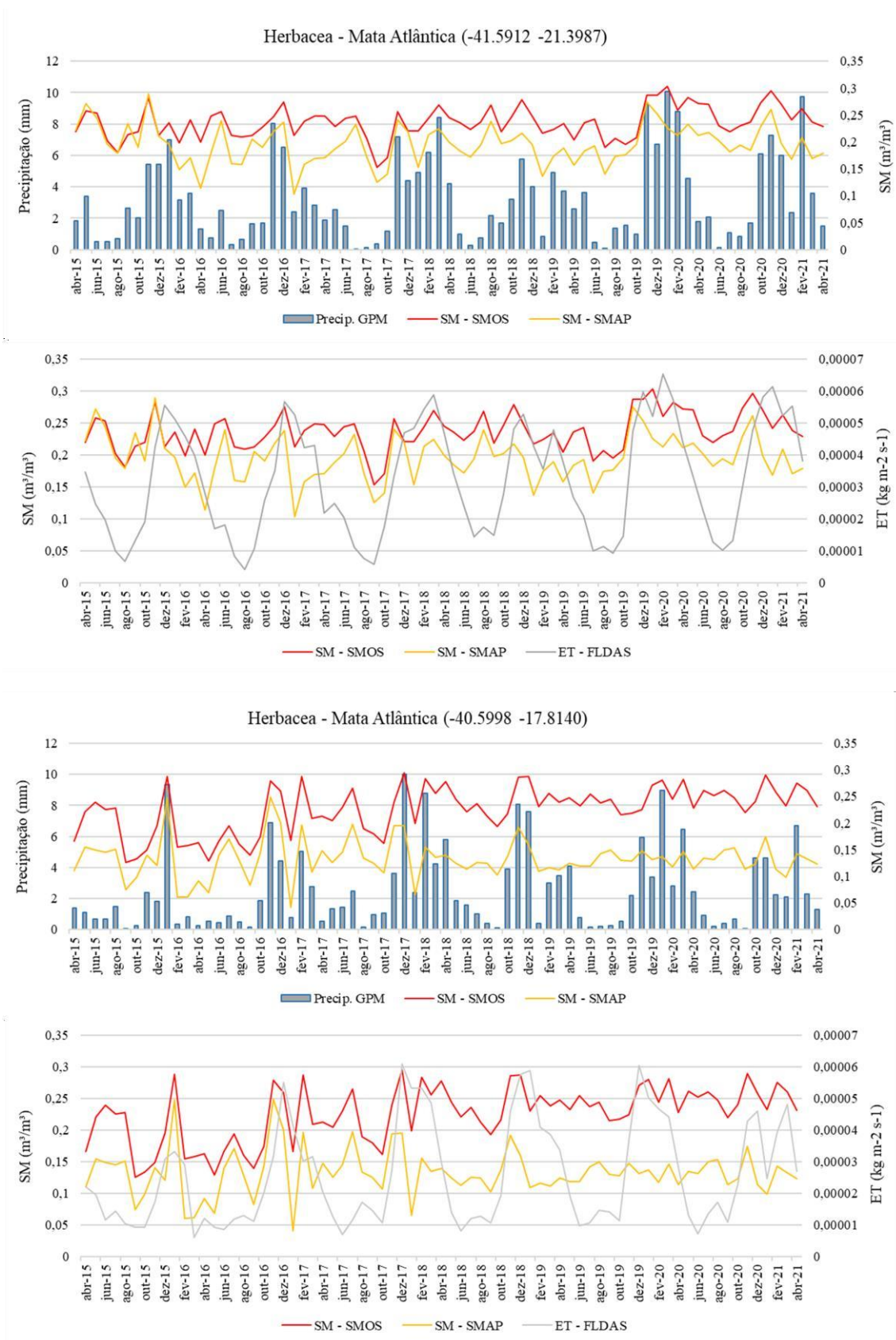


Figura 4.22: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de herbáceas na Mata Atlântica

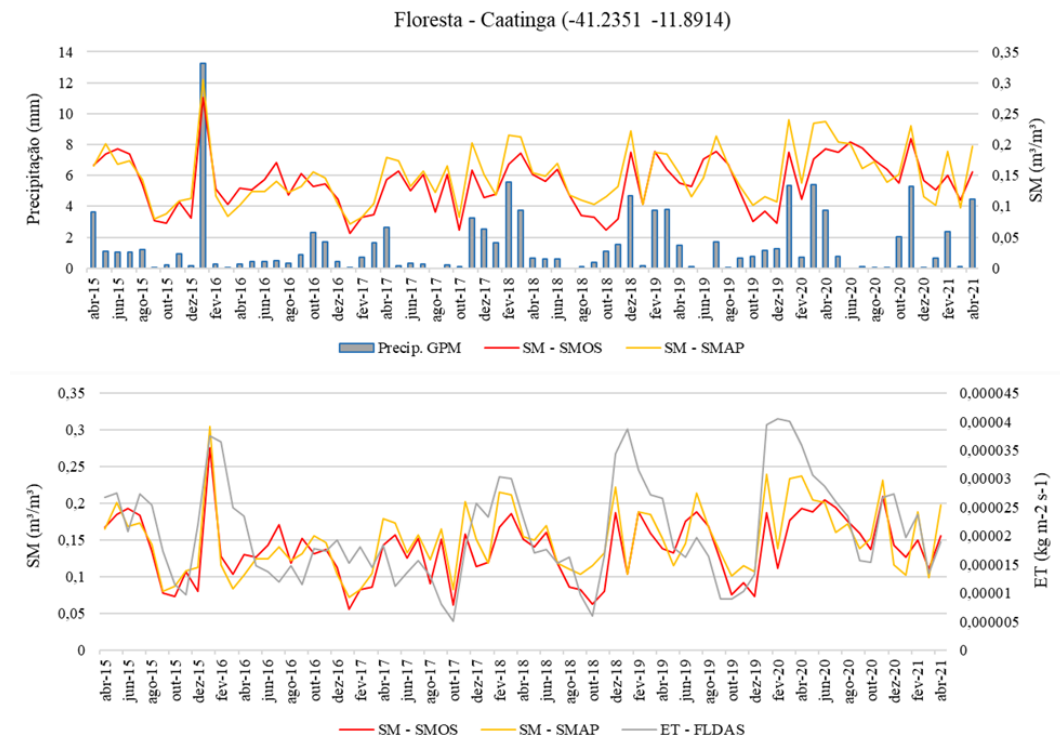


Figura 4.23: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de floresta na Caatinga.

Nas duas áreas de floresta na Mata Atlântica que geraram baixas correlações e coeficiente para ambos os produtos (Figura 4.24), a umidade do solo também não apresenta eventos de sazonalidade (picos alternados). Torna-se relevante considerar que para áreas florestadas, a densidade da vegetação torna-se um elo mais forte no sistema, entre umidade do solo e a atmosfera, uma prova disso é que a evapotranspiração segue os padrões sazonais dos eventos de chuva, mas não da umidade do solo.

Segundo [Seneviratne *et al.* \(2010\)](#), em regiões tropicais úmidas nas quais as florestas raramente são expostas à limitação de umidade do solo devido ao amplo suprimento e a presença de raízes profundas, a atividade da vegetação pode ser maior na estação seca do que na chuvosa, porque a evapotranspiração e a fotossíntese são limitadas pela radiação. Segundo os autores, algumas regiões podem alternar entre os regimes de evapotranspiração e de umidade do solo ao longo do ano, e a mudança entre os dois regimes também depende da cobertura da terra.

Em regiões secas, a evapotranspiração é controlada pela umidade do solo, mas que seu valor absoluto e suas variações é considerado relativamente pequenos para alterar a variabilidade climática. Em regiões mais úmidas a evapotranspiração é maior, mas não é

controlada pela umidade do solo. Já em regiões de transição entre clima seco e úmido, há uma forte dependência da evapotranspiração da umidade do solo e há uma evapotranspiração média maior (Seneviratne *et al.* (2010).

Na área de cultivo no Cerrado que apresentou baixa correlação para o produto SMOS e baixo coeficiente, a umidade do solo estimada pouco varia durante o período de análise. Permanecem com valores proporcionais tanto para períodos secos quanto para períodos de maior precipitação, a qual apresenta grande variação seguida pelas taxas de evapotranspiração. Infere-se, portanto, que pode se tratar de uma área de cultivo irrigada, uma vez que a umidade do solo não apresenta alteração significativa e se mantém constante mesmo nos meses mais secos (Figura 4.25).

E por fim, as duas áreas de cultivo na Mata Atlântica que também apresentaram baixas correlações para ambos os satélites e baixos coeficientes, foi observado que no primeiro ponto, onde há grandes volumes de chuva ao longo do período de análise, a umidade do solo permanece constante, ou seja, com pouca variação. No entanto, a evapotranspiração segue um período sazonal em desequilíbrio com as taxas de umidade do solo e até mesmo dos eventos de precipitação. Nesse ponto, há uma relação inversa entre umidade do solo e evapotranspiração. Nota-se que taxas mais altas de evapotranspiração são associadas com os períodos de menor umidade do solo e vice-versa.

Nessa área em específico, o aumento da evapotranspiração pode ter causado diminuição das taxas de umidade do solo, e essa diminuição pode afetar a vigor da vegetação, o que pode explicar as baixas correlações obtidas entre essas variáveis. Já no outro ponto, os eventos de chuvas se apresentam de forma mais definida seguido pelas taxas de evapotranspiração, que nesse caso, não apresenta aumento que possa ocasionar diminuição da umidade do solo, cujas taxas apresentam picos alternados, seguindo os meses com maior precipitação, porém sem muita alteração nos períodos mais secos, já que as taxas de evapotranspiração também se encontram em valores mais baixos nessa época (menor temperatura) (Figura 4.26).

De modo geral, através da análise deste estudo, observando a variação dos volumes de chuva ou das taxas de evapotranspiração (excetuando os pontos considerados anteriormente), não houve grandes perdas de umidade do solo por conta da ausência de chuvas ou até mesmo do aumento da evapotranspiração, o que ressalta o efeito “memória” da umidade do solo discutido por alguns autores apresentado anteriormente. Desta forma, é considerado que a disponibilidade e o acúmulo de água no solo dependem mais dos fatores físicos e das características de cada ambiente, ou seja, a relação depende mais do tipo de vegetação,

condicionado ao tipo de solo e relevo, ou de alterações na paisagem provocadas pelo uso da terra (ação antrópica) do que dos eventos sazonais climáticos, os quais a umidade do solo tende mais a se assemelhar.

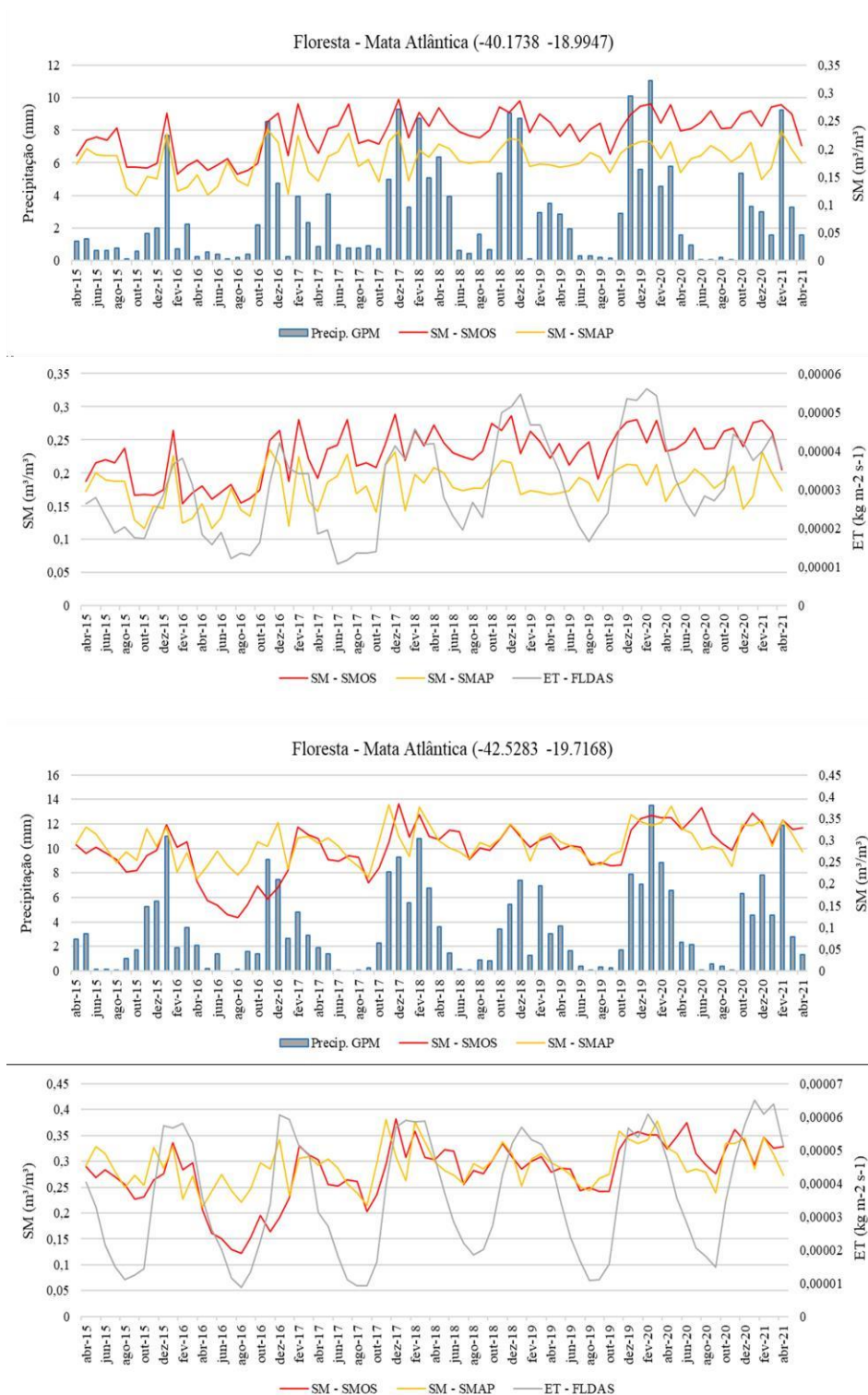


Figura 4.24: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de florestas na Mata Atlântica.

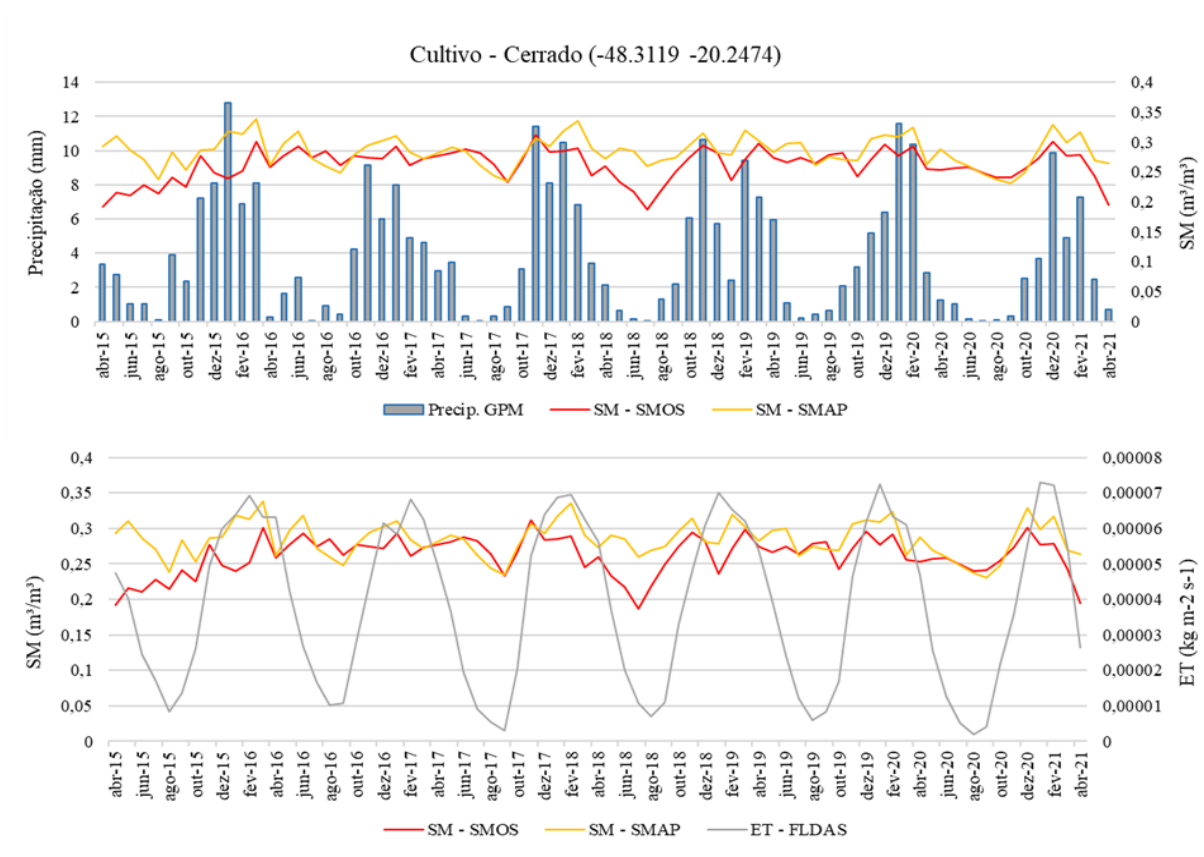


Figura 4.25: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para uma área de cultivo no Cerrado.

Em conformidade ao balanço hídrico, que expressa as entradas e saídas de água em um determinado período, [Novais \(2021\)](#) explica que há uma relação direta entre a umidade do solo e a evapotranspiração. Segundo o autor, a maioria das alterações do sistema climático atribuídas à umidade do solo são causadas pela sua influência sobre o fluxo de calor latente (evapotranspiração) em regimes em que a umidade do solo é restrita. Segundo o autor, o teor de umidade do solo é ligado diretamente ao potencial hídrico do solo ou à capacidade de infiltração. Com a diminuição da umidade, a capacidade de infiltração aumenta e a água remanescente torna-se menos acessível para a absorção pelas raízes das plantas e como consequência, a evapotranspiração é reduzida.

Segundo [Seneviratne et al. \(2010\)](#), a umidade do solo é uma fonte de água para a atmosfera através de processos que levam à evapotranspiração, que incluem principalmente a transpiração das plantas e a evaporação do solo nu. Outro aspecto importante no contexto das interações solo-planta-atmosfera é a persistência associada às anomalias de umidade do solo. Dado que a evapotranspiração da terra é um fluxo de água e energia, a umidade do solo é um

armazenamento de água e energia. Portanto, a “memória de umidade do solo” associada é um componente importante nas interações terra-atmosfera.

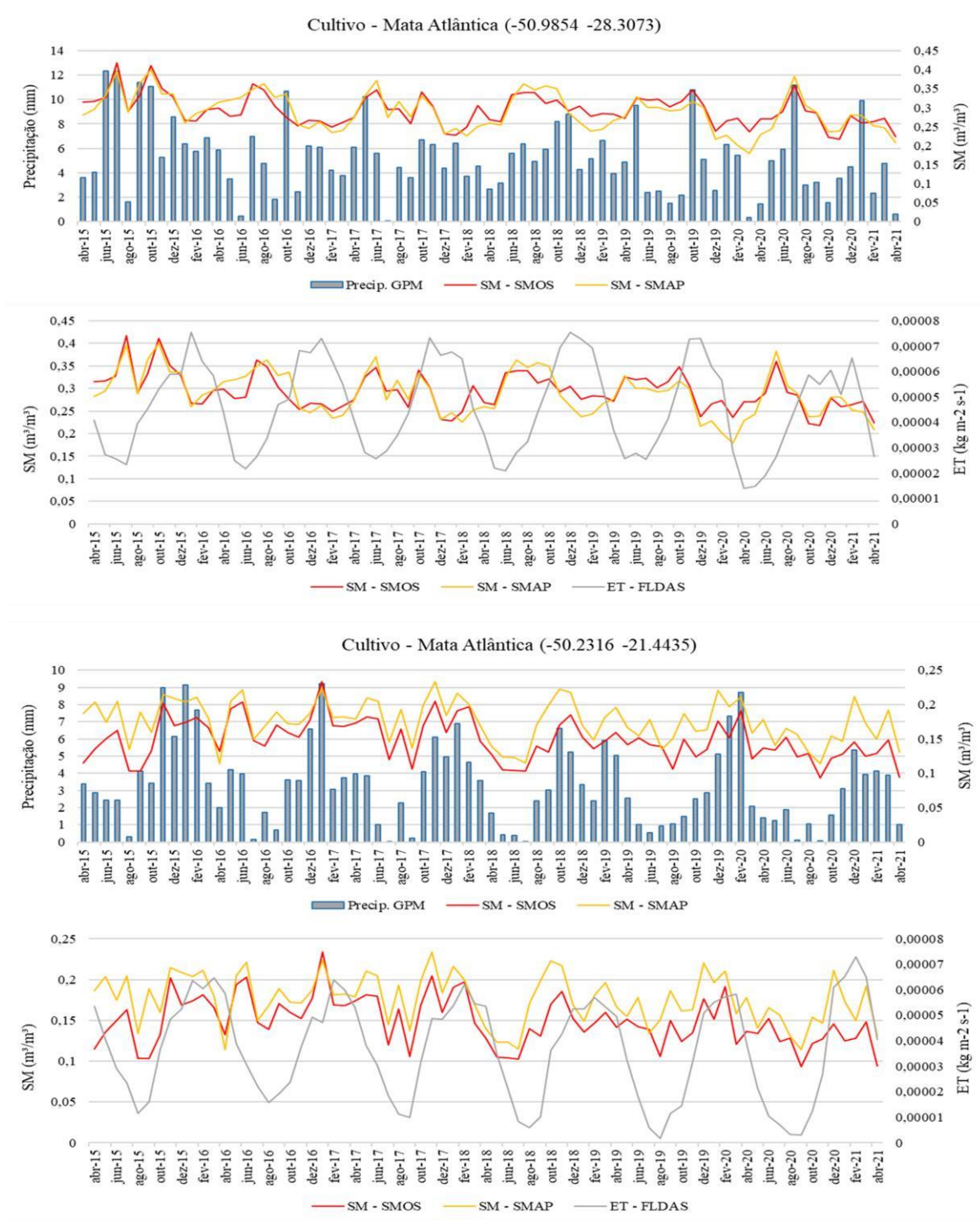


Figura 4.26: Gráficos da relação entre a média mensal da umidade do solo estimada pelos satélites SMOS e SMAP e os dados mensais de precipitação e evapotranspiração para áreas de cultivo na Mata Atlântica.

4.6 Avaliação dos sensores

Aproximadamente 85% dos resultados obtidos, com base nas correlações e estatística de regressão a partir da variável umidade do solo estimada dos sensores do SMOS e SMAP para os três biomas, apresentaram boa correlação, com desempenho mais preciso nas regiões mais secas do Cerrado e Caatinga. As áreas de Mata Atlântica por conter topografia mais complexa e áreas de florestas mais densas, apresenta maior imprecisão nas estimativas, assim como algumas áreas de cultivo, devido a sua heterogeneidade.

Basicamente, quase todos os pontos analisados foram bem correlacionados com os eventos de chuva, com o NDVI e com as taxas de evapotranspiração ao longo do período de análise. Mesmo sendo estimada apenas na camada superficial, a umidade do solo estando correlacionada de forma significativa com o NDVI, que em tese representa o vigor da vegetação, que melhora de acordo com a disponibilidade e a facilidade de extração de água pelas raízes, tanto a umidade do solo superficial quanto o NDVI, podem servir como bons indicadores de umidade do solo em camadas subsuperficiais do solo, correspondente a zona raiz da planta, elucidando a aplicabilidade e combinação dos sensores ópticos e passivos.

Os estudos revisados por [Wigneron *et al.* \(2017\)](#) revelam a dificuldade de estabelecer parâmetros que facilitem a estimativa da vegetação e o solo, para obtenção da estimativa da umidade do solo, a depender das características destes. Avalia-se que a diversidade nas estimativas resulta da heterogeneidade das condições do uso da terra na escala de pegadas da banda L. De acordo com os autores, não é fácil considerar separadamente os efeitos do solo e da vegetação nas estimativas. A principal diferença nos diferentes esquemas de recuperação de umidade do solo que foram desenvolvidos na banda L, geralmente depende da abordagem usada para contabilizar os efeitos da vegetação através da profundidade óptica (τ).

Estudos experimentais mostraram que a interceptação de água pelo dossel e os efeitos da serrapilheira podem ter um efeito significativo na recuperação das temperaturas de brilho utilizadas para recuperação da umidade do solo. Os efeitos são mais fortes em ambientes naturais e/ou florestais, onde a vegetação senescente e os substratos orgânicos são mais abundantes. Segundo [Wang *et al.* \(2021\)](#), quando um dossel de vegetação está sobre a superfície do solo, ele atenua a emissão do solo e adiciona sua contribuição à radiação emitida medida por radiômetros de micro-ondas passivos.

Segundo [Fan *et al.* \(2022\)](#), diferentes técnicas de observação também resultam em diferenças na observação. Embora tanto o SMAP quanto o SMOS usem a banda L para gerar

dados de umidade do solo, o instrumento SMAP é um radiômetro de abertura real, enquanto o SMOS usa um radiômetro de abertura sintética e por isso a observação SMOS pode produzir mais ruído interno. No caso do SMOS, as diferentes técnicas de suavização usadas para extrair uma variação temporal suave das recuperações ruidosas da profundidade óptica (de acordo com a análise do algoritmo de recuperação feita por [Wigneron et al. \(2017\)](#)), podem ter contribuído para o bom desempenho do produto L3 - SM utilizado neste estudo.

De acordo com [Fan et al. \(2022\)](#), as características de cada sensor, como sua frequência de detecção, devem ser examinadas em comparação abrangente de cada produto. Geralmente é aceito que a banda L é melhor para detecção de umidade do solo porque é mais sensível a umidade do solo que outras bandas e penetra mais facilmente na vegetação e é menos sensível a mudanças atmosféricas, como chuva forte, do que as bandas C e X de alta frequência e comprimento de onda curto.

Segundo [Karthikeyan et al. \(2017a\)](#), as recuperações de umidade do solo são mais usuais com micro-ondas em baixas frequências, uma vez que frequências mais altas tem menor impacto na atenuação da vegetação. Explicam que o aumento na frequência leva a uma redução na profundidade de origem das emissões (no solo) juntamente com um aumento do efeito de atenuação atmosférica. Embora as observações de micro-ondas sejam menos afetadas pela atmosfera e pela cobertura vegetal – que emite e retro espalha sinais de micro-ondas – elas ainda desempenham um papel significativo na atenuação dos sinais de umidade do solo em frequências mais altas, tornando difícil/impossível recuperar a umidade do solo de regiões densamente vegetadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi avaliado as estimativas de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP, produto SM-L3, corrigido, obtido através de micro-ondas passivas. Em vários estudos ao redor do mundo estes produtos e produtos similares com os mesmos sensores tem sido analisados e tem apresentado bons resultados, assim como os resultados obtidos neste estudo. Estudos também realizados no Brasil considerando outros produtos derivados dos sensores do SMOS e SMAP, avaliando regiões secas no Nordeste, também apresentaram correlações semelhantes.

Neste estudo optou-se pela junção de várias metodologias, comparando as estimativas da umidade do solo com outros produtos como precipitação, evapotranspiração e NDVI, além das características ambientais e climáticas, dado que dos estudos analisados foi apontado a necessidade de considerar tais variáveis para compreender melhor a dinâmica e distribuição da umidade do solo, uma vez que são variáveis chaves que possuem relação intrínseca com a umidade do solo.

Ao considerar três biomas brasileiros e a condição climática tropical, não foi identificado discrepâncias entre taxas de umidade do solo e as variáveis precipitação e evapotranspiração no geral. Temperaturas mais elevadas podem provocar maiores taxas de evapotranspiração, ocasionando alteração nas taxas de umidade do solo, e também, registros menores de umidade do solo contribui para menores taxas de evapotranspiração, e conseqüentemente baixo volume de chuvas, que pode ocasionar aumento de temperatura (dado o fluxo de calor latente), provocando anomalias no ciclo de retroalimentação de todo o sistema, onde a umidade do solo é fator determinante.

Uma vez que foi identificado que a umidade do solo nesses biomas segue o padrão do gradiente climático, o que pode alterar de fato essa dinâmica, será, portanto, as condições físicas/ambientais associada a cada ponto. Foi visto que a densidade da vegetação, considerando também a parte da alteração antrópica (mudanças de cobertura, irrigação, pastagens, principalmente), a textura do solo e o relevo, são fatores decisivos nessa distribuição. Desta forma, a maneira como a vegetação vai responder a umidade do solo e o tempo de resposta (atraso) depende de como o ambiente favorece essa interação.

Conclui-se através deste estudo que o sistema solo-planta-água-atmosfera é bem dinâmico no Brasil e pode variar conforme as características geográficas locais. Que é possível estabelecer a umidade do solo observando taxas de evapotranspiração e precipitação em escala

regional, no entanto, ao considerar o índice da vegetação, a interação passa a ser mais solo-planta, ou seja, e relação entre a umidade do solo e a vegetação depende de como está configurado o contexto ambiental/geográfico. Por fim, tendo analisado as variações da umidade do solo no Brasil em relação ao NDVI e as outras variáveis, entende-se o porquê de a umidade do solo ser tratada como um parâmetro variável na literatura, pois é parte de um modelo de sistema que varia, que regionalmente se mantém, mas localmente pode ser alterada.

REFERÊNCIAS

ADEGOKE, J. O. E A. M. CARLETON (2002). Relations between soil moisture and satellite vegetation indices in the us corn belt. *Journal of hydrometeorology* 3(4), 395–405.

ALVARES, C., J.L. STAPE, P. SENTELHAS, J. GONÇALVES, E G. SPAROVEK (2013). Köppen's climate classification map for brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22(6), 711–728.

ALVES, J. A. (2007). Geocologia da caatinga no semiárido do nordeste brasileiro. *Climatologia e Estudos da Paisagem* 2(1), 58–71.

ARAÚJO, D. C. D. S., S. M. G. L. MONTENEGRO, A. C. GUSMÃO, E D. F. RODRIGUES (2018). Validation of SMOS-IC soil moisture over brazilian semiarid using in situ measurements. *EPiC Series in Engineering* 3, 54–61.

BARCELONA EXPERT CENTER (2020). BEC SMOS soil moisture products description. <https://bec.icm.csic.es/products-documentation/>. Acesso em: ago. 2022.

BENJAMIN, J. G., M. M. MIKHA, E M. F. VIGIL (2008). Organic carbon effects on soil physical and hydraulic properties in a semiarid climate. *Soil Science Society of America Journal* 72(5), 1357–1362.

BRITO, L. T. D. L., M. B. BRAGA, E T. NASCIMENTO (2010). Impactos ambientais da irrigação no Semiárido brasileiro (BRITO, L. T. de L. and MELO, R. F. de and GIONGO, V. ed.), Capítulo Impactos ambientais causados pela agricultura no Semiárido brasileiro, pp. 137–169. Petrolina: Embrapa Semiárido.

BUCHHORN, M., B. SMETS, L. BERTELS, B. DE ROO, M. LESIV, N.-E. TSENDBAZAR, M. HEROLD, E.S. FRITZ (2020). Copernicus global land service: Land cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe.

CAMPOS, M., I. AMORIM DE OLIVEIRA, R. AQUINO, A. BERGAMIN, E D. SILVA (2013, 09). Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Agroambiente* 7, 119.

CHO, M. A., J. VAN AARDT, R. MAIN, E B. MAJEKE (2010). Evaluating variations of physiology-based hyperspectral features along a soil water gradient in a eucalyptus grandis plantation. *International Journal of Remote Sensing* 31(12), 3143–3159.

COSTA, T. A. (2017). Estimativa da umidade do solo na região semiárida do Brasil pelo método do triângulo universal. Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos – São Paulo.

COUTINHO, L. M. (2006, 05). O conceito de bioma. *Acta Botanica Brasilica* 20, 13–23.
Ehlers, R. S. (2007). Análise de séries temporais (Sandes, Ehlers ed.). Departamento de Estatística, UFPR.

EMBRAPA (2023). Cerrados. <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: 23 mar 2023.

FAN, J., M. LUO, Q. HAN, F. LIU, W. HUANG, E S. TAN (2022, 04). Evaluation of smos, smap, amsr2 and fy-3c soil moisture products over china. *PLOS ONE* 17, 1–23.

FARRAR, T., S. NICHOLSON, E A. LARE (1994). The influence of soil type on the relationships between ndvi, rainfall, and soil moisture in semiarid botswana. ii. ndvi response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 50(2), 121–133.

GADÊLHA, A. N. (2018). Análise da Missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre o território brasileiro. Tese de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – Paraíba.

GESDISC (2018). Ges disc dataset: Fldas noah land surface model l4 global monthly 0.1 x 0.1 degree (merra-2 and chirps) (fldas_noah01_c_gl_m 001). https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/FLDAS_NOAH01_C_GL_M_001/summary. (Accessed on 04/28/2023).

GILLIES, R., W. KUSTAS, E K. HUMES (1997). A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the normalized difference vegetation index (ndvi) and surface e. *International journal of remote sensing* 18(15), 3145–3166.

GIS GEOGRAPHY (2023). O que é Sensoriamento Remoto? <https://gisgeography.com/>. Acesso em: 23 mar 2023.

GU, Y., E. HUNT, B. WARDLOW, J. B. BASARA, J. F. BROWN, E J. P. VERDIN (2008). Evaluation of modis ndvi and ndwi for vegetation drought monitoring using oklahoma mesonet soil moisture data. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL035772>. (Accessed on 04/28/2023).

HUFFMAN, G., E. STOCKER, D. BOLVIN, E. NELKIN, E J. TAN (2019). Ges disc dataset: Gpm imerg final precipitation l3 1 day 0.1 degree x 0.1 degree v06 (gpm_3imergdf 06). https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GPM_3IMERGDF_06/summary. (Accessed on 04/28/2023).

IBGE (2012). Manual técnico da vegetação brasileira. Technical report, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ.

IBGE (2015). Manual técnico de pedologia. Technical report, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ.

JENSEN, J. R. (2007). Remote Sensing of the Environment: an Earth Resources Perspective (2nd ed.). Pearson Prentice Hall, New Jersey.

JET PROPULSION LABORATORY (2022). SMAP handbook - soil moisture active passive. <https://smap.jpl.nasa.gov/data/>. Acesso em: 16 ago. 2022.

JPL - JET PROPULSION LABORATORY - NASA (2012). <http://swot.jpl.nasa.gov>. Internet site visited on 17 septembre.

JUCA, M., A. SOUZA, E A. RIBEIRO NETO (2019). Avaliação de produtos de sensoriamento remoto de umidade do solo em relação a dados in situ em diferentes regiões climáticas de Pernambuco. In XXIII SBRH-Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Foz do Iguaçu, Brazil. Sociedade Brasileira de Recursos Hídricos.

KARTHIKEYAN, L., M. PAN, N. WANDERS, D. N. KUMAR, E E. F. WOOD (2017a). Four decades of microwave satellite soil moisture observations: Part 1. a review of retrieval algorithms. *Advances in Water Resources* 109, 106–120.

KARTHIKEYAN, L., M. PAN, N. WANDERS, D. N. KUMAR, E E. F. WOOD (2017b). Four decades of microwave satellite soil moisture observations: Part 2. product validation and inter-satellite comparisons. *Advances in Water Resources* 109, 236–252.

KIRCHHOFF, G. (1860). I. on the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 20(130), 1–21.

LATORRE, M., L. ANDERSON, Y. SHIMABUKURO, O. CARVALHO JÚNIOR (2022). Sensor MODIS: características gerais e aplicações. *Revista Espaço e Geografia* 6(1), 91–121.

LIU, H., X. XIN, Z. SU, Y. ZENG, T. LIAN, L. LI, S. YU, E H. ZHANG (2023). Intercomparison and evaluation of ten global et products at site and basin scales. *Journal of Hydrology* 617(128887), 1–17.

LIU, S., D. A. ROBERTS, O. A. CHADWICK, E C. J. STILL (2012). Spectral responses to plant available soil moisture in a californian grassland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 19, 31–44.

MALLICK, K., B. K. BHATTACHARYA, E N. PATEL (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and ndvi. *Agricultural and Forest Meteorology* 149(8), 1327–1342.

MASKE, B. B. (2016). Assimilação de dados de umidade do solo derivada de satélite no modelo SSIB acoplado ao MCGA/CPTEC. Dissertação de mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, São Paulo.

MCNALLY, A., K. ARSENAULT, S. KUMAR, S. SHUKLA, P. PETERSON, S. WANG, C. FUNK, C. D. PETERS-LIDARD, E J. P. VERDIN (2017). A land data assimilation system for sub-saharan africa food and water security applications | dados científicos. <https://www.nature.com/articles/sdata201712>. (Accessed on 04/28/2023).

MEDEL, J., F. DÍAZ, E C. GARCIA (2021). Estudo da correlação cruzada e da correlação múltipla dos sinais de ruído binário generalizado. https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbai/article/view/2613. (Accessed on 04/28/2023).

MELO, J. D. O., C. R. D. MELLO, A. M. D. SILVA, J. M. D. MELLO, M. R. VIOLA, E S. D. N. M. YANAGI (2017). Temporal stability of soil moisture under effect of three spacings in a eucalyptusstand. *Acta Scientiarum. Agronomy* 39, 393–400.

MIRANDA, T. F. (2017). Análise de desempenho de técnicas de indicação de causalidade aplicadas a alarmes industriais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal - RN.

MMA (2015). Mapa da vegetação nativa na Área de aplicação da lei 11.428/2006 - lei da mata atlântica. Technical report, FUNCATE- Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais, Brasília, DF.

MONTGOMERY, D., C. JENNINGS, E M. KULAHCI (2015). Introduction to Time Series Analysis and Forecasting. New Jersey, USA: 1-469 p.

MORETTIN, P. E C. D. CASTRO TOLOI (2006). Análise de séries temporais. ABE - Projeto Fisher. Edgard Blucher.

NASA (2023). Earth Data - National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.earthdata.nasa.gov/>. Acesso em: 23 mar 2023.

NASCIMENTO, A. C. (2002). Avaliação da umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM 049/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

NOVAIS, J. D. J. (2021). Modelagem de dados de Sensoriamento Remoto para o mapeamento digital se solos e índice Relativo de Umidade dos Solos no Distrito Federal. Tese(doutorado), Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária -Brasília.

O'NEILL, P., S. CHAN, E. NJOKU, T. JACKSON, R. BINDLISH, J. CHAUBELL, E A. COLLIANDER (2021). Smap enhanced l3 radiometer global and polar grid daily 9 km ease-grid soil moisture version 5. Technical report, Tech. Rep., 2021. Acesso em: 16 de ago. 2022.

PAREDES-TREJO, F. E H. BARBOSA (2017). Evaluation of the smos-derived soil water deficit index as agricultural drought index in northeast of brazil. *Water* 9(6), 377.

PEREIRA, A. B. (2009). Mata atlântica: uma abordagem geográfica. *Nucleus* 6(1), 27–53.

PORTAL, G., T. JAGDHUBER, M. VALL-LLOSSERA, A. CAMPS, M. PABLOS, D. ENTEKHABI, E M. PILES (2020). Assessment of multi-scale smos and smap soil moisture products across the iberian peninsula. *Remote Sensing* 12(3), 570.

QIU, Y., B. FU, J. WANG, E L. CHEN (2001). Soil moisture variation in relation to topography and land use in a hillslope catchment of the loess plateau, china. *Journal of Hydrology* 240(3-4), 243–263.

RIBEIRO, H., N. FERREIRA, W. OLIVEIRA, E K. OLIVEIRA, VICTOR AND KOPP (2019). Pantanal: Espaço geográfico e as tecnologias em análise (Zuffo, Alan ed.), Capítulo Distribuição da Pluviometria, NDVI e Umidade do solo nos biomas brasileiros, pp. 94–106. Ponta Grossa,PR: Atena Editora.

RIBEIRO, J. F. E. B. M. T. WALTER (1998). Cerrado: ambiente e flora (Sano, S.M and Almeida, S.P ed.), Capítulo Fitofisionomias do bioma cerrado, pp. 89–166. Planaltina, DF.

ROMANO, N. (2014). Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *Journal of Hydrology* 516, 6–20.

SANTOS, L. O. F. D., C. A. S. QUERINO, J. K. A. D. S. QUERINO, A. L. PEDREIRA JUNIOR, A. R. D. M. MOURA, N. G. MACHADO, E M. S. BIUDES (2019). Validation of rainfall data estimated by gpm satellite on southern amazon region. *Revista Ambiente & Água* 14(Rev. Ambient. Água, 2019 14(1)), e2249.

SANTOS, W. J. R. D. (2014). Umidade do solo na zona radicular e sua relação com vigor vegetativo medido por sensoriamento remoto em escala de manejo. Tese de doutorado – Universidade Federal de Lavras, Lavras – Minas Gerais.

SCHNUR, M. T., H. XIE, E X. WANG (2010). Estimating root zone soil moisture at distant sites using modis ndvi and evi in a semi-arid region of southwestern usa. *Ecological Informatics* 5(5), 400–409.

SENEVIRATNE, S. I., T. CORTI, E. L. DAVIN, M. HIRSCHI, E. B. JAEGER, I. LEHNER, B. ORLOWSKY, E A. J. TEULING (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews* 99(3), 125–161.

SILVA, P. D. N. (2022). Avaliação da precipitação estimada pelo satélite GPM para a Bacia Hidrográfica do Rio Sapucaí. Tese de Mestrado – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá – Minas Gerais.

SILVA, R. H. (2018). Comportamento espacial e temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica da região sul de Minas Gerais. Dissertação (mestrado acadêmico), Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais.

SOUZA, A. G. S. S. (2019). Índice de seca no Estado de Pernambuco utilizando dados de umidade do solo do Satélite SMOS. Tese (doutorado), Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE.

SPATAFORA, L., M. VALL-LLOSSERA, A. CAMPS, D. CHAPARRO, R. ALVALÁ, E H. BARBOSA (2020, 04). Validation of smos l3 and l4 soil moisture products in the remedhus (spain) and cemaden(brazil) networks. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 691.

TOLENTINO JR., J. B. (2022). Irrigação Pressurizada. Livro [online] - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Rurais, SC.

TORRES, F., C. KUKI, G. FERREIRA, B. VASCONCELLOS, A. FREITAS, P. SILVA, C. SOUZA, E M. REBOITA(2020). Validação de diferentes bases de dados de precipitação nas bacias hidrográficas do sapucaí e são francisco. *Revista Brasileira de Climatologia* 27, 368–404.

TSAI, F. E W. PHILPOT (1998). Derivative analysis of hyperspectral data. *Remote sensing of environment* 66(1), 41–51.

VAIPHASA, C. (2006). Consideration of smoothing techniques for hyperspectral remote sensing. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 60(2), 91–99.

WANG, X., H. LÜ, W. T. CROW, Y. ZHU, Q. WANG, J. SU, J. ZHENG, E Q. GOU (2021). Assessment of smos and smap soil moisture products against new estimates combining physical model, a statistical model, and in-situ observations: A case study over the huai river basin, China. *Journal of Hydrology* 598, 126468.

WANG, X., H. XIE, H. GUAN, E X. ZHOU (2007). Different responses of modis-derived ndvi to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions. *Journal of hydrology* 340(1-2), 12–24.

WIGNERON, J.-P., T. JACKSON, P. O'NEILL, G. DE LANNOY, P. DE ROSNAY, J. WALKER, P. FERRAZ- ZOLI, V. MIRONOV, S. BIRCHER, J. GRANT, M. KURUM, M. SCHWANK, J. MUNOZ-SABATER, N. DAS, A. ROYER, A. AL-YAARI, A. AL BITAR, R. FERNANDEZ-MORAN, H. LAWRENCE, A. MIALON, M. PAR-RENS, P. RICHAUME, S. DELWART, E Y. KERR (2017). Modelling the passive microwave signature from land surfaces: A review of recent results and application to the l-band smos & smap soil moisture retrieval algorithms. *Remote Sensing of Environment* 192, 238–262.

XU, X. E S. K. FREY (2021). Validation of smos, smap, and esa cci soil moisture over a humid region. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 14, 10784–10793.

ZREDA, M., D. DESILETS, T. FERRÉ, E R. L. SCOTT (2008). Measuring soil moisture content non invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons | wiley online library. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2008GL035655>. (Accessed on 04/28/2023).

ZREDA, M., W. SHUTTLEWORTH, X. ZENG, C. ZWECK, D. DESILETS, T. FRANZ, E R. ROSOLEM (2012). Cosmos: The cosmic-ray soil moisture observing system. *Hydrology and Earth System Sciences* 16(11), 4079–4099.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro das características físicas e ambientais

Tipo de Classe/Bioma	Coordenadas		Características Físicas Geográficas	
	Longitude	Latitude	Pedologia/Geomorfologia	Vegetação
Herbácea / Cerrado	-55.495767	-21.001077	Vertissolo Háplico Carbonático / Horizonte A chernozêmico / Textura argilosa / Relevo plano / Dissecado / Topo tabular / Planaltos e Patamares da Borda Ocidental da Bacia do Paraná	Pecuária (pastagens) / Savana Parque com floresta de galeria / Área Antrópica Dominante
	-46.500408	-20.23722	Cambissolo Háplico Tb Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média cascalhenta, argilosa cascalhenta e média, argilosa / Relevo ondulado e forte ondulado / Aplanado / Pediplano / Planaltos da Canastra	Savana Gramínio-lenhosa com floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante
	-43.726161	-4.541553	Plintossolo Argilúvico Distrófico / Horizonte A fraco e A moderado / Textura média e média argilosa / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Baixo Planalto e Tabuleiros do Médio Rio Itaipuru	Savana Parque/Arborizada com floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante / Pecuária (pastagens)
Herbácea / Caatinga	-39.556569	-12.314319	Planossolo Háplico Eutrófico / Horizonte A fraco e A moderado / Textura arenosa média, arenosa argilosa e média argilosa / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Depressão Sertaneja Meridional	Pecuária (pastagens) / Savana Estépica Arbustiva e Arborizada / Área Antrópica Dominante
	-39.430474	-12.377272		
	-38.737949	-6.397683	Luvissolo Crômico Órtico / Horizonte A moderado / Textura média argilosa / Relevo suave ondulado e ondulado / pedregoso / Dissecado / Topo aguçado / Depressão Sertaneja	Savana Estépica Arborizada / Vegetação Natural Dominante / Agropecuária
Herbácea / Mata Atlântica	-41.591212	-21.398796	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico / Horizonte A moderado / Textura média argilosa e média muito argilosa / Relevo forte ondulado / Dissecado / Topo convexo / Depressões do Rio Parnaíba do Sul	Pecuária (pastagens) / Floresta Estacional Semidecidual / Vegetação Secundária sem palmeiras / Reflorestamento com Eucaliptos / Área Antrópica Dominante
	-40.599841	-17.814052	Latossolo Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado / Textura argilosa / Relevo ondulado e forte ondulado / Rampa de colúvio/acumulado / Plano coluvial / Colinas e Morros Costeiros do Sudeste	Pecuária (pastagens) / Floresta Estacional Semidecidual / Agricultura / Vegetação Secundária sem palmeiras / Área Antrópica Dominante
	-35.765933	-8.479521	Planossolo Háplico Eutrófico / Horizonte A fraco e A moderado / Textura arenosa média, arenosa argilosa e média argilosa / Relevo suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Planalto da Borborema	Agropecuária / Savana Estépica e Floresta Estacional / Área Antrópica Dominante em Tensão Ecológica / Vegetação Secundária
	-52.601571	-15.301674	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado /	Savana Parque/Arborizada com floresta de galeria / Savana Gramínio-lenhosa com floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante

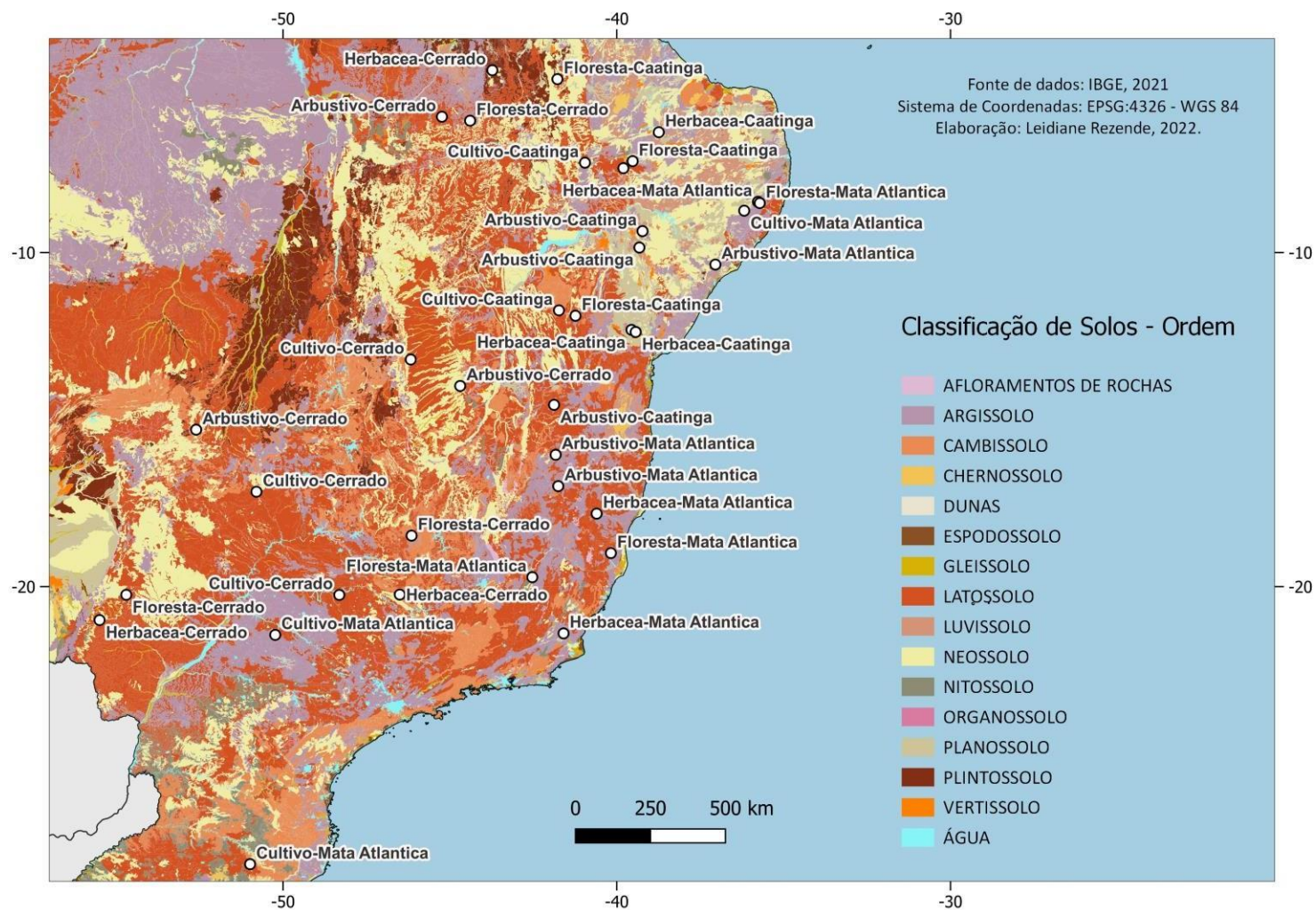
Arbustivo / Cerrado	-45.236903	-5.932958	Pediaplano / Baixos Planaltos e Chapadas dos Altos Rios Gurupi, Grajaú e Mearim	Savana Arborizada com floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante / Pecuária (pastagens)
	-44.68932	-13.99262	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico / Horizonte A fraco e A moderado / Textura média / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Chapadas de São Francisco	Savana Parque/Arborizada sem floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante
Arbustivo / Caatinga	-41.875682	-14.558145	Argissolo Vermelho Eutrófico / Horizonte A moderado / Textura média argilosa / Relevo ondulado e forte ondulado / Dissecado / Topo convexo / Depressão Sertaneja Meridional	Savana Estépica Arborizada / Vegetação Natural Dominante / Pecuária (pastagens)
	-39.225389	-9.357678	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico / Horizonte A fraco / Textura média argilosa/ Relevo suave ondulado / pedregoso / Dissecado / Topo tabular / Patamares Dissecados dos Rios Real e Vaza-Barris	Savana Estépica Arborizada sem palmeiras e sem floresta de galeria / Vegetação Natural Dominante
	-39.319615	-9.8487560	Luvissolo Crômico Órtico / Horizonte A fraco / Textura média argilosa / Relevo suave ondulado e plano / Dissecado / Topo tabular / Depressão Sertaneja Meridional	
Arbustivo / Mata Atlântica	-41.827671	-16.052776	Cambissolo Háplico Tb Distrófico / Horizonte A moderado/ textura argilosa cascalhenta / Relevo forte ondulado e ondulado / Dissecado / Topo aguçado / Serranias Orientais do Planalto dos Geraizinhos	Pecuária (pastagens) / Floresta Estacional Decidual / Vegetação Secundária sem palmeiras / Afloramento rochoso / Área Antrópica Dominante
	-41.750877	-16.991755	Dissecado / Topo Convexo / Chapadas de Jequitinhonha	Agropecuária / Floresta Estacional Decidual / Vegetação Secundária sem palmeiras / Área Antrópica Dominante
	-37.041521	-10.358467	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico / Horizonte A proeminente e A moderado / Textura médio argilosa/ Relevo suave ondulado / Dissecado / Topo Convexo / Patamares Dissecados dos Rios Real e Vaza-Barris	Agropecuária / Floresta Estacional Semidecidual / Área Antrópica Dominante / Vegetação Secundária
Floresta / Cerrado	-54.694567	-20.244408	Latossolo Vermelho Acriférico / Horizonte A moderado / Textura argilosa e muito argilosa / Relevo suave ondulado e plano / Dissecado / Topo convexo / Planalto do Rio Paraná	Savana Arborizada sem floresta de galeria / Floresta Estacional / Vegetação Secundária sem palmeiras / Vegetação Natural Dominante em Tensão Ecológica
	-46.14595	-18.472344	Cambissolo Háplico Tb Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média, argilosa e média cascalhenta, argilosa e argilosa cascalhenta / Relevo ondulado e forte ondulado / Serras e Patamares do São Francisco	Savana Florestada/Arborizada com floresta de galeria / Savana Gramíneo-lenhosa / Vegetação Natural Dominante
	-44.392163	-6.052274	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico/Horizonte A moderado / Textura média / Relevo plano e suave ondulado / Dissecado / Topo tabular / Baixos Planaltos e Chapadas dos Altos Rios Gurupi, Grajaú e Mearim	Savana Arborizada sem floresta de galeria / Savana/Floresta Estacional Vegetação Natural Dominante
	-41.235153	-11.891437	Latossolo Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado e A fraco / Textura média / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Planalto da Diamantina	Floresta Estacional Semidecidual Montana / Vegetação Natural Dominante / Vegetação Secundária

Floresta / Caatinga	-39.521689	-7.262984	Latossolo Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado e A proeminente / Textura argilosa e média / Relevo plano e suave ondulado / não pedregoso / Aplanado / Pediplano / Chapadas do Nordeste Oriental	Savana e Floresta Estacional – Ecótono / Vegetação Natural Dominante em Tensão Ecológica
	-41.775235	-4.808175	Latossolo Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média/ relevo plano / pedregoso / Dissecado / Topo tabular / Baixas Chapadas e Tabuleiros do Médio Rio Parnaíba	Savana-Estépica e Floresta Estacional – Ecótono / Vegetação Natural Dominante em Tensão Ecológica / Agricultura com Culturas cíclicas / Pecuária (pastagens)
Floresta / Mata Atlântica	-35.712458	-8.519011	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado/ Textura argilosa / Relevo forte ondulado / Dissecado / Topo Convexo / Planalto da Borborema	Floresta Estacional Semidecidual Submontana / Vegetação Secundária e Natural Dominante
	-40.173832	-18.994743	Argissolo Amarelo Distrocoeso / Horizonte A moderado / textura arenosa argilosa e média argilosa / Relevo plano e suave ondulado / Dissecado / Topo tabular / Tabuleiros costeiros	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas / Vegetação Secundária sem palmeiras / Vegetação Natural Dominante
	-42.528388	-19.716839	Latossolo Amarelo Alumínico / Horizonte A moderado / Textura muito argilosa e argilosa / Relevo ondulado e forte ondulado / Dissecado / Topo convexo / Depressão Interplanáltica do Médio Rio Doce	Floresta Estacional Semidecidual Submontana / Vegetação Natural Dominante
	-48.311926	-20.247408	Latossolo Vermelho Distrófico / Horizonte A moderado / Textura Argilosa e muito argilosa / Relevo suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Planalto do Rio Paraná	Agricultura com Culturas Cíclicas / Savana /Floresta Estacional / Pecuária (pastagens) / Vegetação Secundária sem palmeiras / Área Antrópica Dominante em Tensão Ecológica
Cultivo / Cerrado	-46.170917	-13.200567	Gleissolo Háptico Tb Distrófico / Horizonte A moderado, A proeminente e Hístico / Textura arenosa média, média e média argilosa / Relevo plano / Aplanado / Pediplano / Chapadas do São Francisco	Agricultura com Culturas Cíclicas / Savana / Área Antrópica Dominante
	-50.794744	-17.159109	Latossolo Vermelho Ácrico / Horizonte A moderado / Textura argilosa e muito argilosa / Relevo plano e suave ondulado	Agricultura com Culturas Cíclicas / Pecuária (pastagens) / Savana Parque com floresta de galeria / Área Antrópica Dominante
Cultivo / Caatinga	-41.730003	-11.729989	Latossolo Vermelho Eutrófico / Horizonte A moderado / Textura média e argilosa / Relevo plano e suave ondulado / Aplanado / Pediplano / Depressão Sertaneja Meridional	Agricultura com Culturas Cíclicas / Pecuária (pastagens) / Savana Estépica Arborizada / Área Antrópica Dominante
	-39.799166	-7.473467	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico / Horizonte A moderado / Textura média argilosa / Relevo suave ondulado e plano / Dissecado / Topo tabular / Patamar Sertanejo	Agropecuária / Área Antrópica Dominante / Savana Estépica Arbustiva
	-40.950829	-7.309138	Latossolo Amarelo Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média / Relevo plano e suave ondulado / Dissecado / Topo tabular / Baixas Chapadas e Tabuleiros do Médio Rio Parnaíba	Agricultura com Culturas Permanentes / Pecuária (pastagens) / Área Antrópica Dominante / Savana Estépica Florestada

Cultivo / Mata Atlântica	-50.985436	-28.307342	Latossolo Bruno Distroférrico / Horizonte A proeminente / Textura muito argilosa / Relevo ondulado / Dissecado / Topo convexo / Planalto das Araucárias	Agricultura com Culturas Cíclicas / Estepe/Gramíno-lenhosa com floresta de galeria / Agricultura com Culturas Permanentes / Área Antrópica Dominante
	-50.231645	-21.443559	Latossolo Vermelho Distrófico / Horizonte A moderado / Textura média / Relevo plano / Dissecado / Topo tabular / Planalto do Rio Paraná	Agricultura com Culturas Cíclicas / Floresta Estacional Semidecidual / Pecuária (pastagens) / Vegetação Secundária sem palmeiras / Área Antrópica Dominante
	-36.178716	-8.74576	Neossolo Regolítico Distrófico / Horizonte A fraco / Textura arenosa / Relevo ondulado e plano / Aplanado / Pediplano / Planalto da Borborema	Agropecuária / Savana Estépica e Floresta Estacional / Área Antrópica Dominante em Tensão Ecológica / Vegetação Secundária

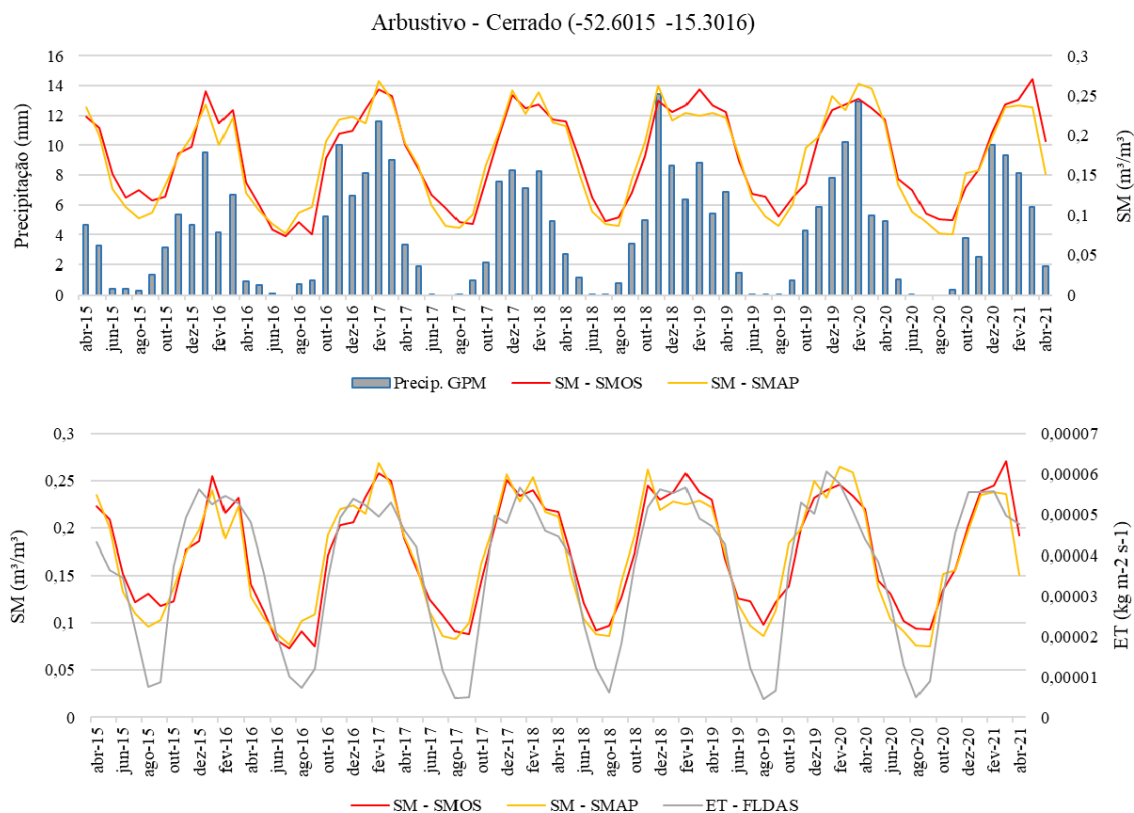
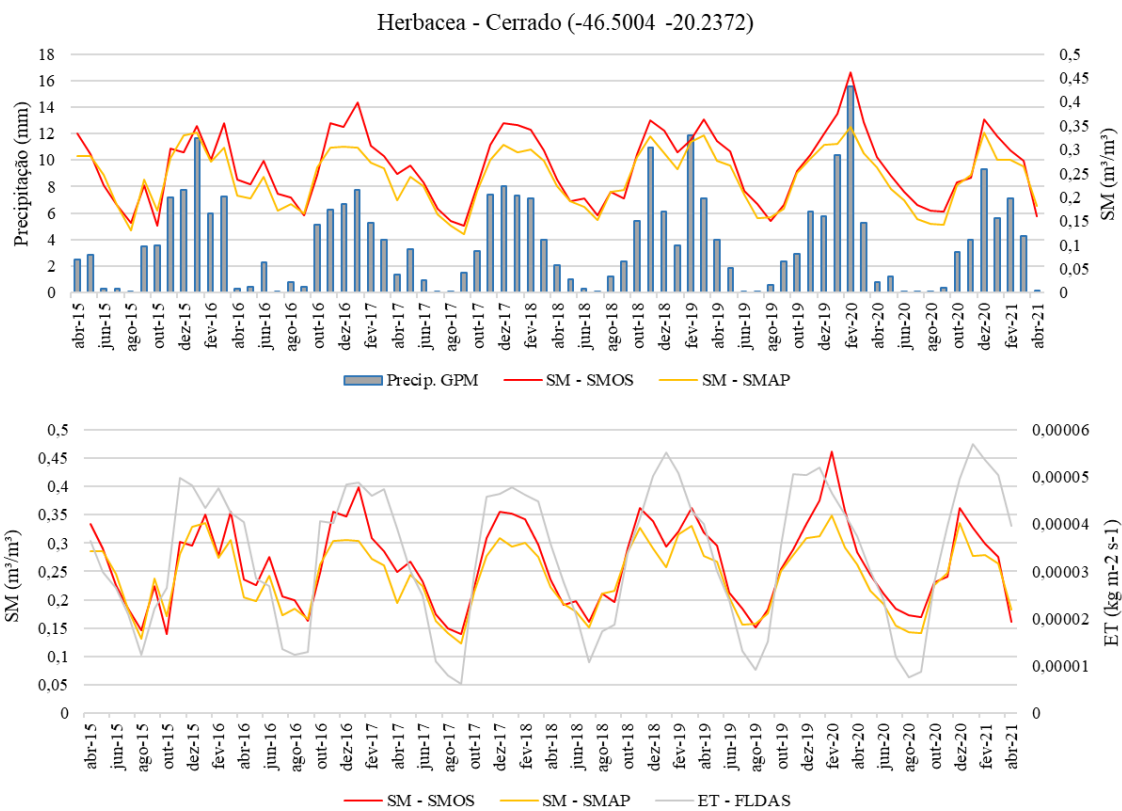
APÊNDICE B

Figura A.1: Mapa de Classificação de Solos de acordo com as classes definidas pelo IBGE

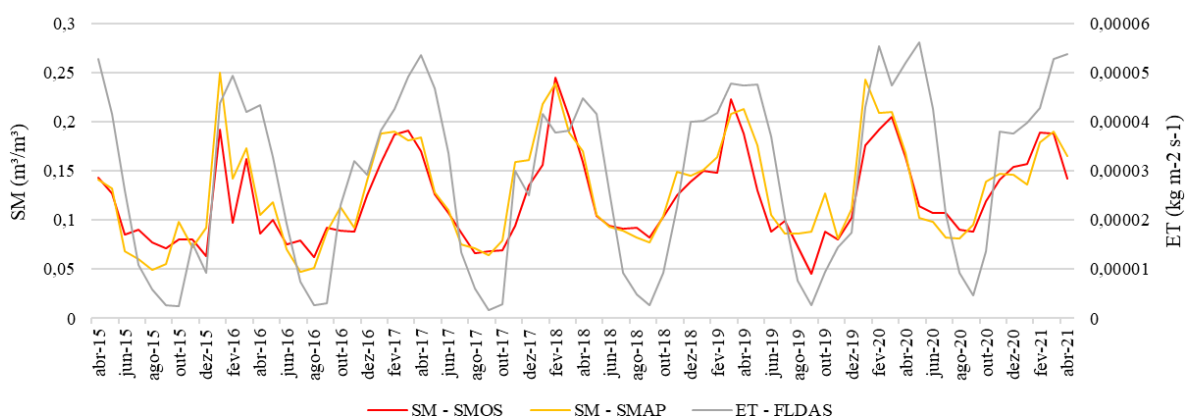
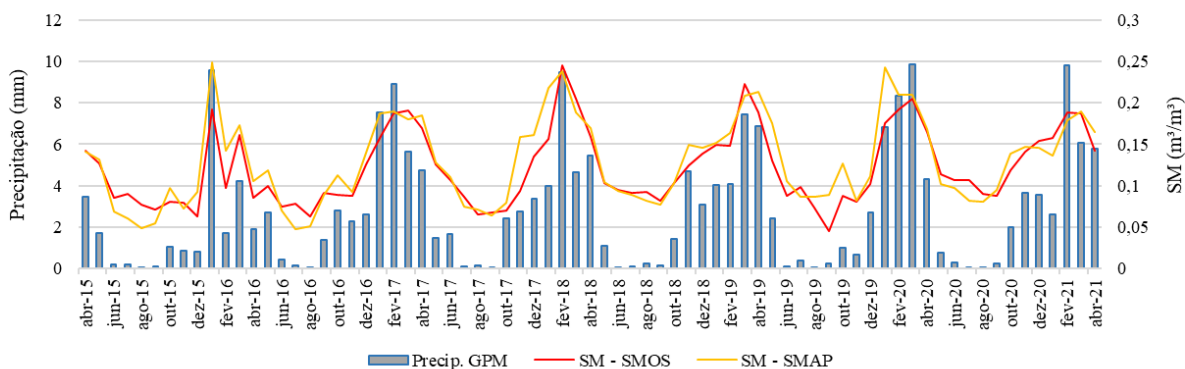


APÊNDICE C

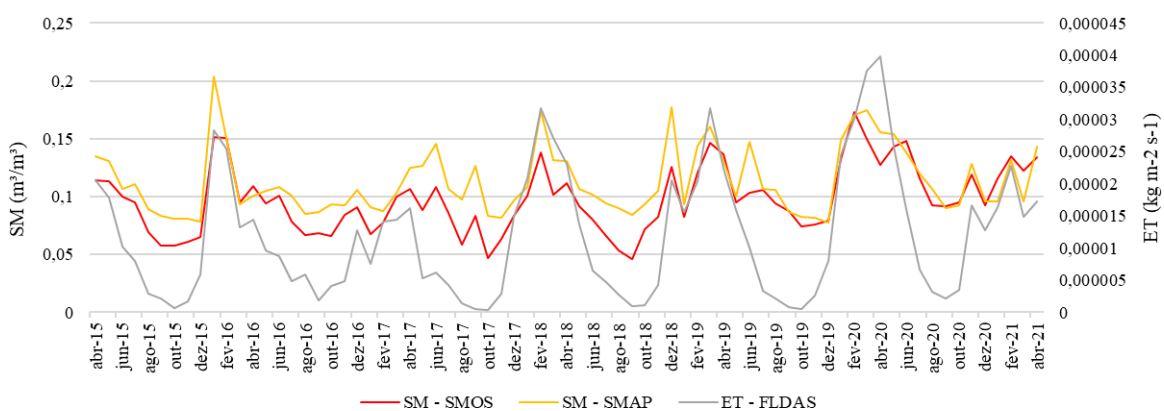
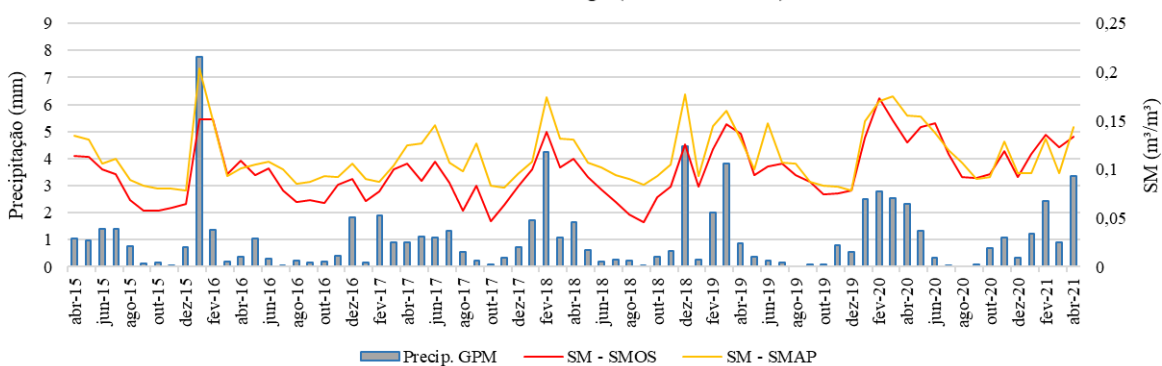
Gráficos temporais das médias mensais de umidade do solo, precipitação e evapotranspiração (demais pontos).



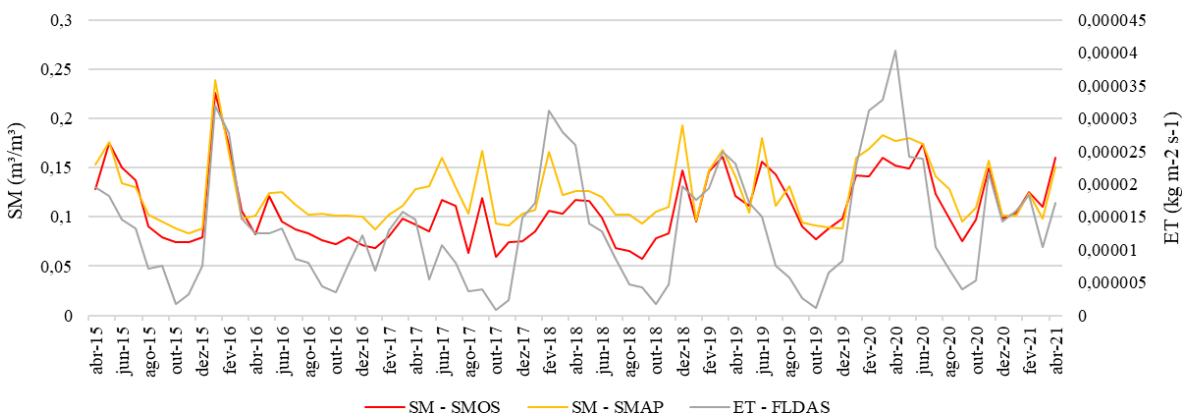
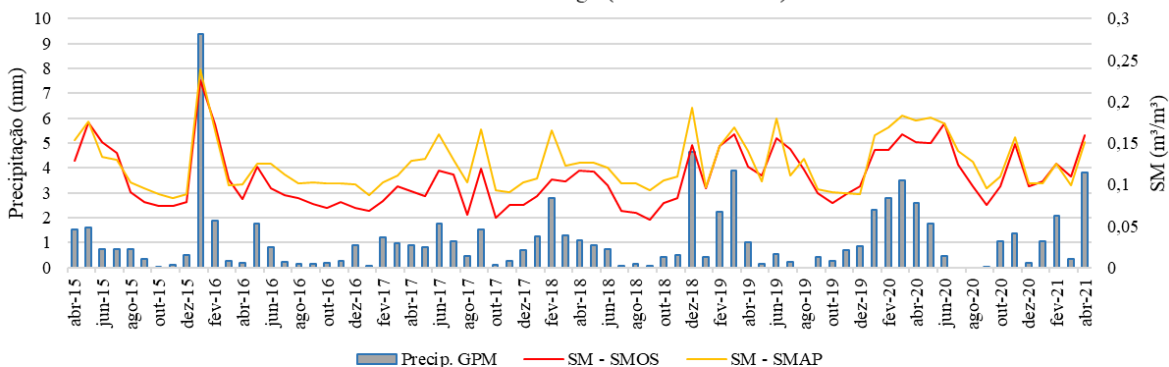
Arbustivo - Cerrado (-45.2369 -5.9329)



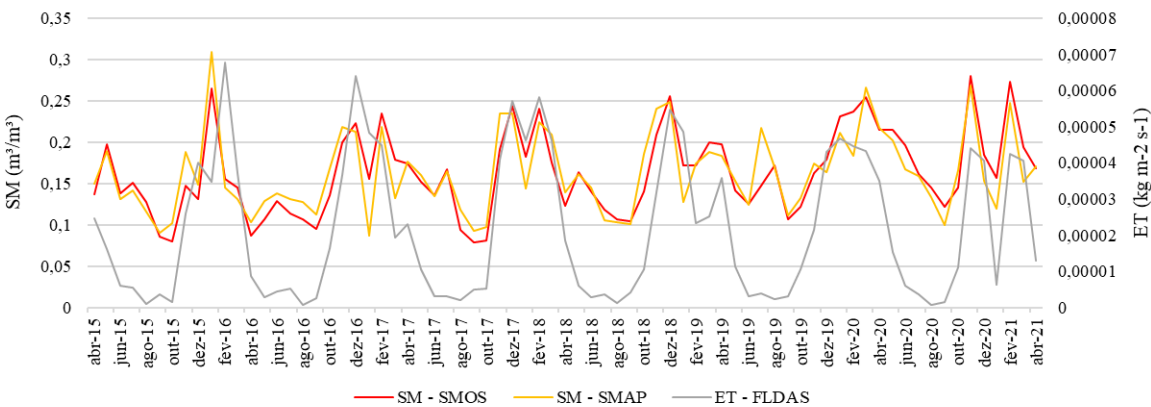
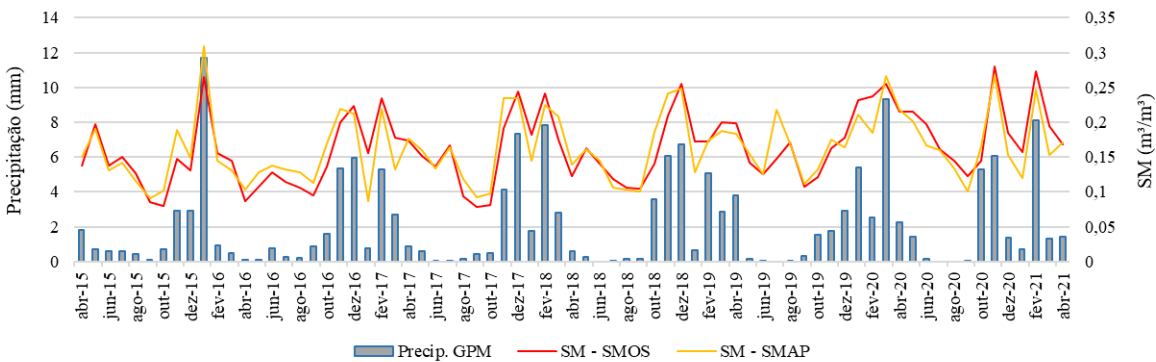
Arbustivo - Caatinga (39.2253 -9.3576)

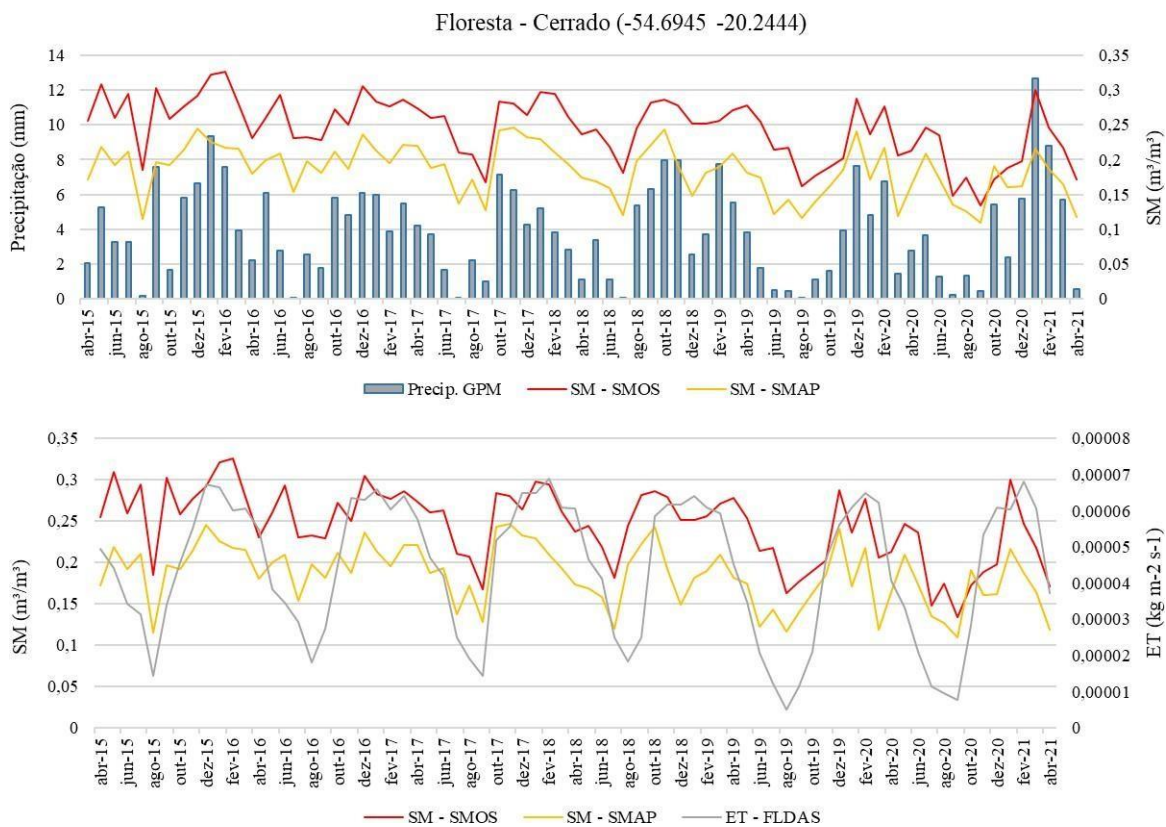
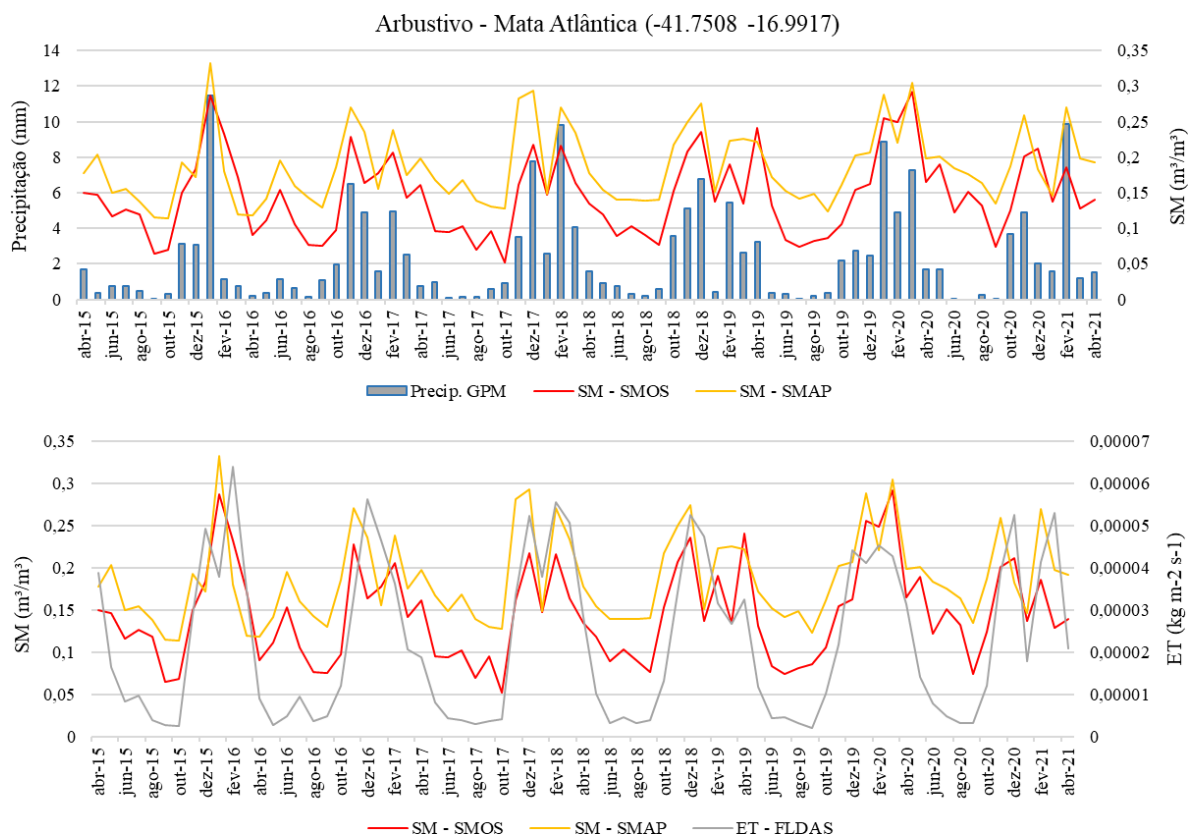


Arbustivo - Caatinga (-39.3196 -9.8487)

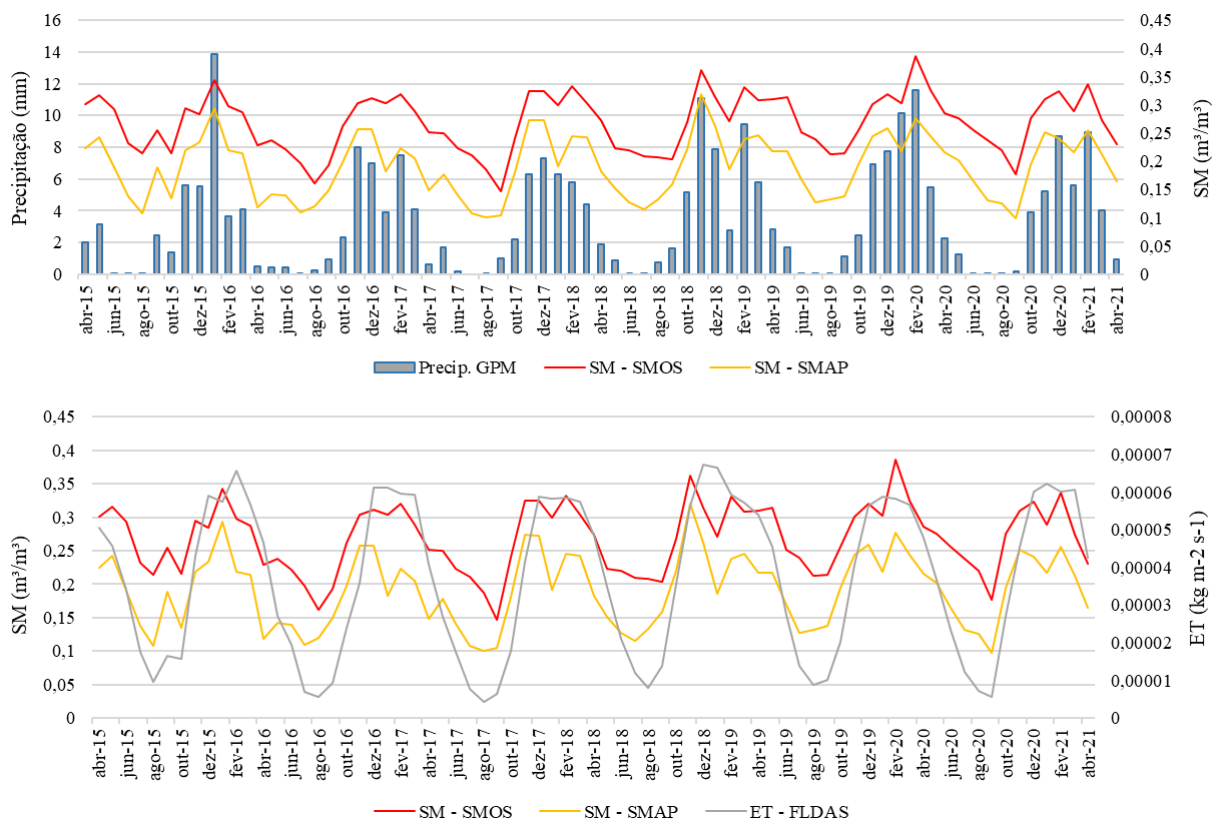


Arbustivo - Mata Atlântica (-41.8276 -16.0527)

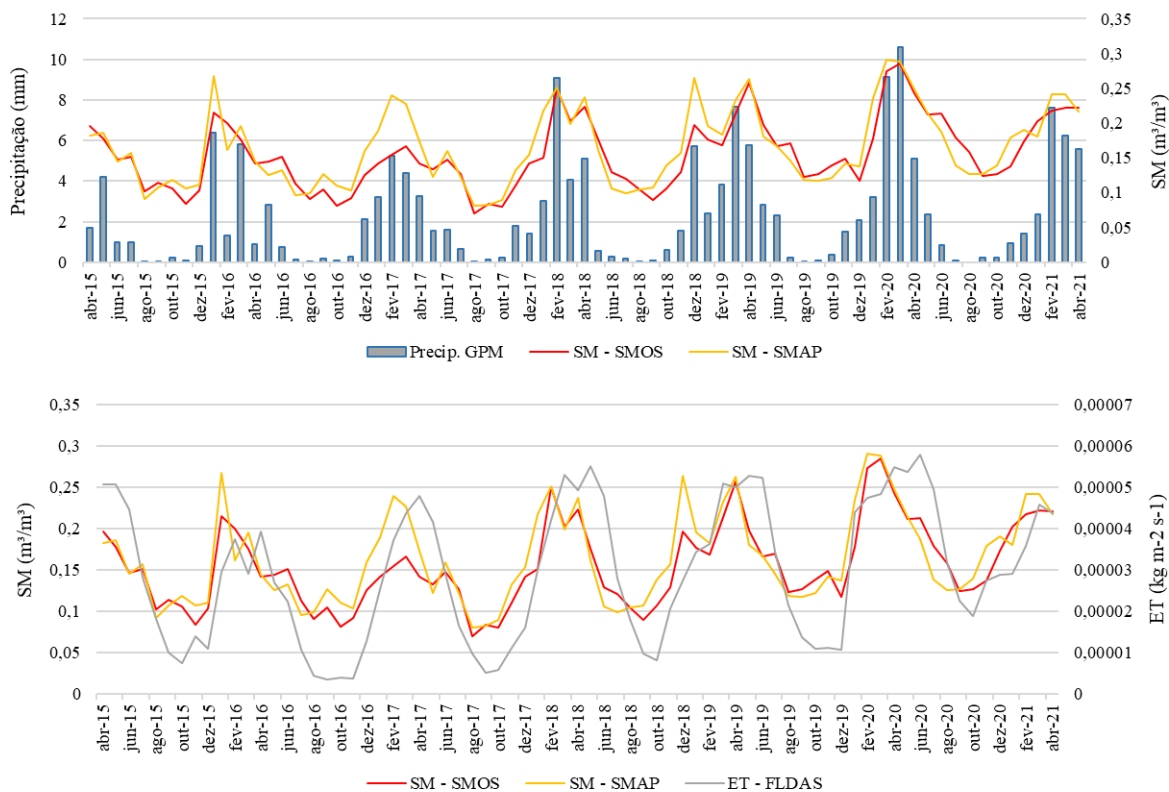


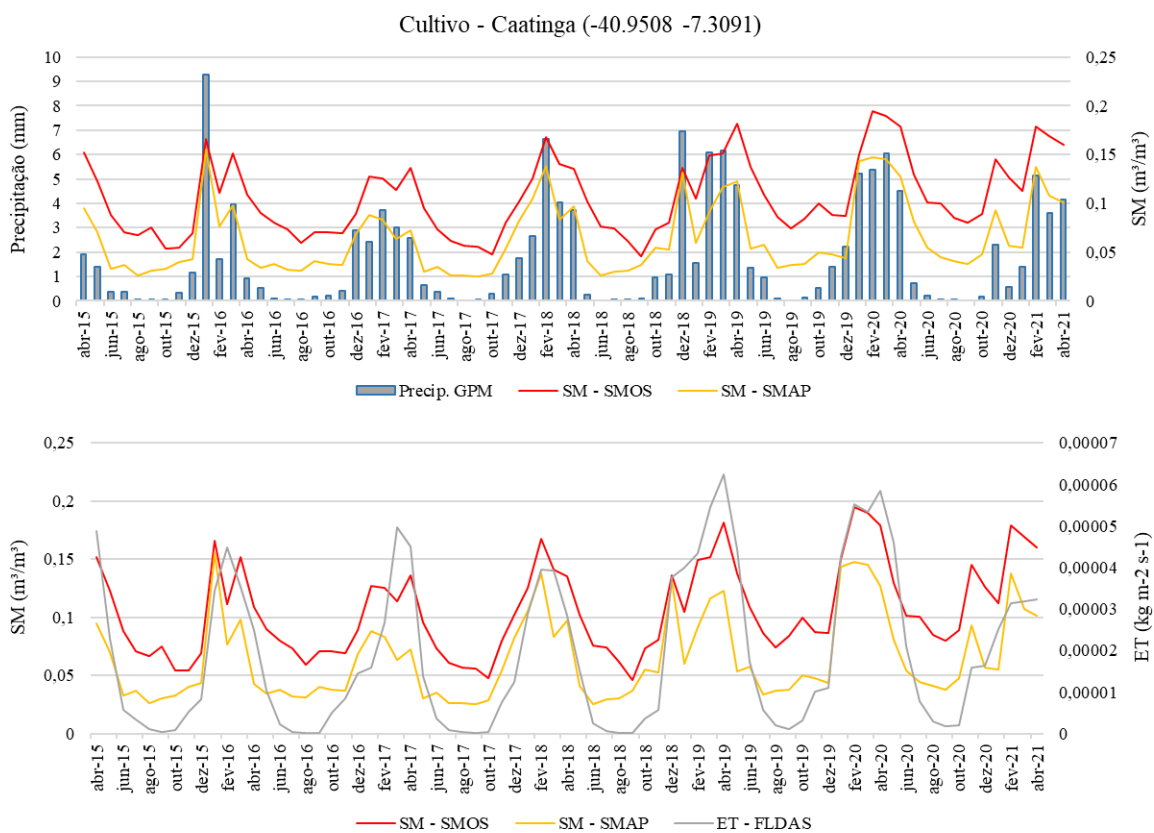
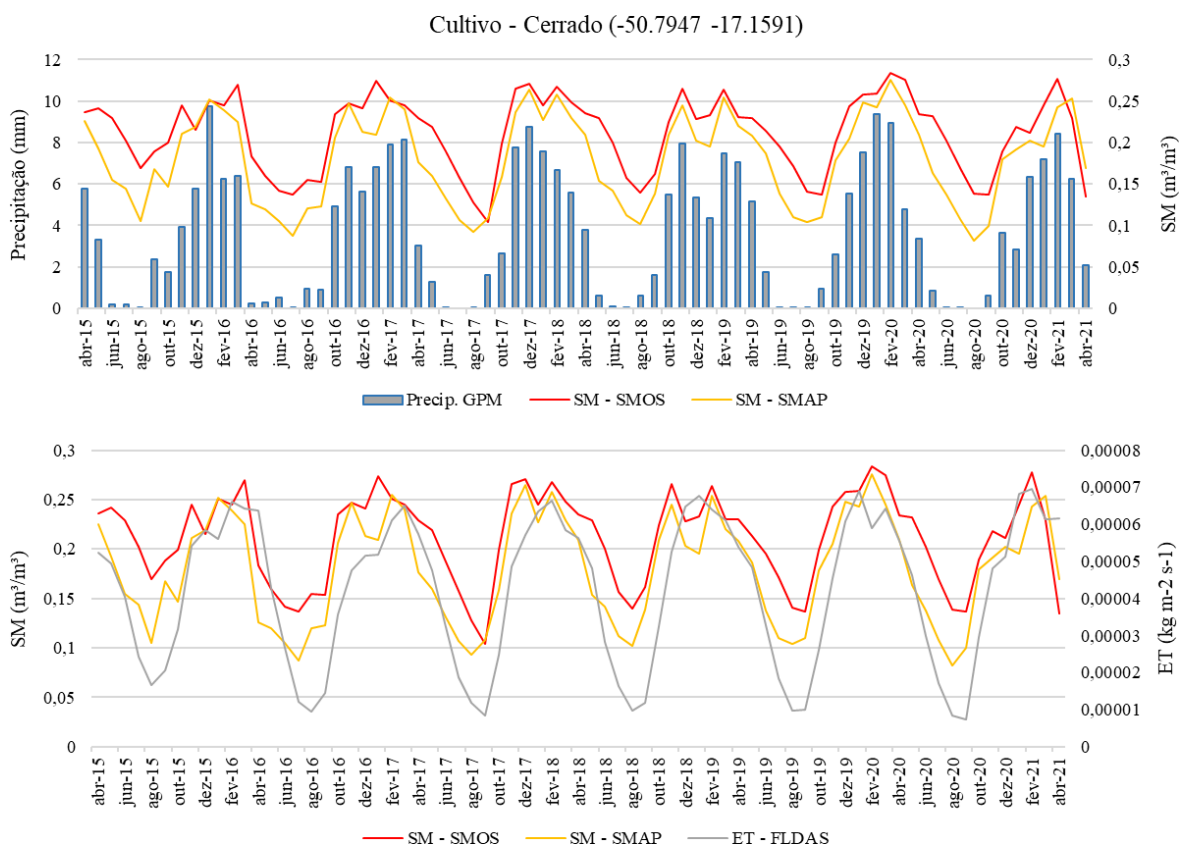


Floresta - Cerrado (-46.1459 -18.4723)

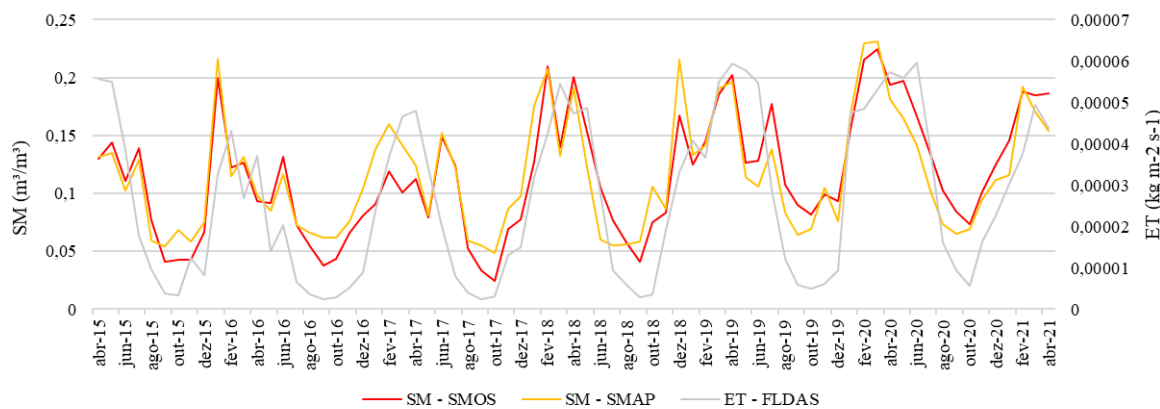
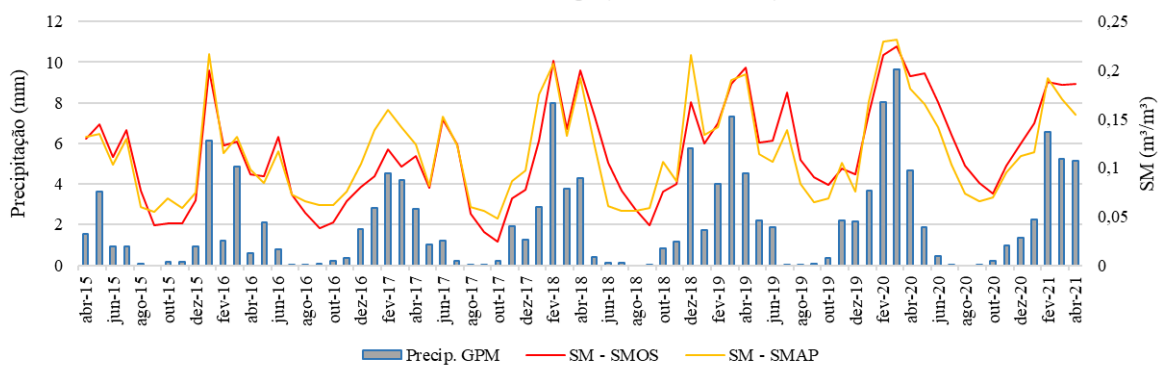


Floresta - Caatinga (-39.5216 -7.2629)





Cultivo - Caatinga (-39.7991 -7.4734)



APÊNDICE D

Artigo completo apresentado no XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, abril 2023, Florianópolis - SC.

VARIAÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA UMIDADE DO SOLO E DO NDVI DE COBERTURAS VEGETAIS DO CERRADO E DA CAATINGA

Leidiane de Paula Rezende¹, Philippe Maillard², Jorge Adelino de Freitas³

^{1,2,3}Departamento de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627, Belo Horizonte, MG 31310-570, leidianedepaula@outlook.com, philippemaillard@yahoo.com.br, jadf202017@gmail.com

RESUMO

Este estudo avaliou a relação entre a umidade do solo estimada pelo sensor do satélite SMOS e o NDVI do sensor MODIS considerando os biomas do Cerrado e Caatinga e quatro tipos de coberturas vegetais (herbácea, arbustiva, floresta e cultivo) e sua variação espaço-temporal. Foi encontrado uma boa correlação com valores em torno de 0,5 a 0,7. O tempo de resposta da vegetação determinado através da melhor correlação obtida, variou de dias a semanas em relação a umidade do solo, sendo influenciado por fatores climáticos e características pedológicas. Ambas as séries tenderam a apresentar o mesmo padrão sazonal, com picos de NDVI e umidade do solo nos períodos mais úmidos e baixos para períodos secos. Como os dois produtos se correlacionaram bem entre si, são considerados como bom indicadores de conteúdo e disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave – SMOS, NDVI, umidade do solo, vigor da vegetação, correlação cruzada.

ABSTRACT

This study evaluated the relationship between soil moisture estimated by the SMOS satellite sensor and the NDVI from the MODIS sensor considering the biomes of Cerrado and Caatinga and four types of vegetation cover (herbaceous, shrub, forest and crops) as well as their spacial-temporal variation. A good correlation was found with values around 0.5 to 0.7. The vegetation response time, determined through the best correlation obtained, varied from days to weeks in relation to soil moisture, being influenced by climate factors and soil characteristics. Both series tended to show the same seasonal pattern, with NDVI and soil moisture peaking during the wet season and lowering in the dry season. As the two products are well correlated, they can be good indicators of soil water content and availability.

Key words – SMOS, NDVI, soil moisture, vegetation vigor, corss-correlation.

1. INTRODUÇÃO

A umidade do solo é uma variável importante e determinante no balanço hídrico e equilíbrio de energia na superfície da Terra [1–4]. É determinada através do conteúdo de água no solo, obtido com a razão entre o volume de água e volume do solo seco [5]. Serve para aplicação e construção de modelos ligados às variações climáticas, produtividade agrícola, saúde da vegetação e previsão de seca. Sua distribuição espacial e temporal é controlada por fatores climáticos e ambientais,

bem como o uso antrópico relacionado à cultura e manejo do solo [4, 6]. Para a agricultura, a distribuição espacial e temporal da umidade do solo pode fornecer informações essenciais para análise e manejo da irrigação, uso racional da água, escolha da época de plantio, e o funcionamento do sistema solo-água-planta-atmosfera [1, 7].

A interação da umidade do solo com as demais variáveis do ciclo hidrológico, a torna uma variável essencial na modelização hidrológica e ambiental [5]. Neste contexto, a utilização de produtos de sensoriamento remoto permite o monitoramento contínuo, uma agilidade na estimativa e a compreensão de da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo. Sensores remotos utilizados para estimativa da umidade do solo abrangem uma ampla extensão do espectro eletromagnético, desde a região de micro-ondas até a região óptica. Nas micro-ondas, a estimativa da umidade do solo pode ser feita tanto por sensores ativos quanto passivos, no entanto, sensores ativos sofrem com interferência da rugosidade da superfície e da vegetação. Os sensores passivos registram a energia que emana da superfície terrestre, denominada de temperatura de brilho que permite estimar a umidade do solo através da relação direta entre a emissividade da superfície e a umidade presente no solo, dada pela diferença de constantes dielétricas de solo seco e úmido, e por isso se tornam essenciais para estimar a umidade do solo. Dentre as missões mais recentes de micro-ondas passivas, está o satélite *Soil Moisture and Ocean Salinity* (SMOS) lançado pela Agência Espacial Europeia (ESA), que possui um radiômetro na banda L (1.4 GHz, comprimento de ondas de 21 cm) que sofre menos interferência que outras bandas de frequência mais elevadas de outros sensores [8].

Produtos de micro-ondas passivas podem ser associados a produtos de sensores ópticos como os índices de vegetação (NDVI) ou água (NDWI) [3]. A análise e quantificação remota da vegetação em várias resoluções espaciais, temporais e espectrais, permite monitorar o seu vigor, que é também relacionado indiretamente à umidade da zona raiz pelo qual a vegetação extrai a água necessária [2]. No geral, a planta tende a ajustar seus processos biológicos para coincidir com a condição climática local e a disponibilidade de água, no entanto, é preciso considerar que a planta necessita de um tempo para responder às modificações do ambiente, que é dado como o “tempo de atraso de resposta” em relação a umidade. Neste aspecto, este estudo associa a umidade do solo estimada pelo satélite SMOS com o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) do sensor MODIS afim de entender como a vegetação responde à umidade do solo em vários contextos vegetacionais (biomas). Foram considerados 24 pontos amostrais sendo três pontos para cada tipo de cobertura vegetal (herbácea, arbustiva, floresta e cultivo) dos biomas

Cerrado e Caatinga.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para o estudo foi utilizado o produto de umidade do solo SMOS L3 de 25 km, diário, fornecido pelo *Barcelona Expert Center* – BEC. Os produtos SMOS L3 são dados globais de umidade do solo na grade EASE-2 obtidos pela média ponderada por *Data Quality Index* – DQX das medições ESA L2 de todas as órbitas do SMOS, estimados a partir da temperatura de brilho de Nível 1C, cuja filtragem descarta valores não confiáveis. O NDVI foi calculado a partir da razão entre as bandas 1 (vermelho) e 2 (infravermelho próximo) na resolução de 250 m do sensor MODIS (Espectrorradiômetro de Imagem de Resolução Moderada) operando através dos satélites Terra e Aqua.

Com o objetivo de analisar espacialmente e temporalmente a umidade do solo e sua relação com o NDVI, foram selecionados 24 pontos nos biomas do Cerrado e Caatinga, sendo 3 pontos para um eventual tipo de cobertura como herbácea, arbustivo, floresta e cultivo dentro de cada bioma. Os pontos foram selecionados a partir de uma camada dos biomas, juntamente com o mapa global de cobertura da terra fornecido pelo site da Copernicus do ano de 2019, resolução de 100 m, [9].

Os valores de umidade do solo e do NDVI foram adquiridos com base em programas desenvolvidos em Python 3.10, além da análise estatística. Os valores de umidade do solo foram mesclados das órbitas ascendentes e descendentes, convertendo-os em valores diários de uma única série. O NDVI foi adquirido e calculado através da plataforma *Google Earth Engine* – GEE. Todas as séries temporais tiveram seus valores interpolados, considerando um limite de dados ausentes de até 5 dias no máximo. A interpolação linear foi calculada com base na média entre valores anteriores e posteriores do dado ausente, obtendo a diferença entre o dado real e o observado.

Um filtro de média móvel foi aplicado para as séries temporais da umidade do solo do SMOS a fim de remover o ruído aleatório dos dados. É calculado o valor médio de todos os pontos dentro de uma janela considerando a média de n dias antes e depois. À medida que essa janela avança, novos valores são definidos, constituindo uma nova série temporal com valores suavizados [10]. Como neste estudo é pressuposto que haverá um atraso relativo do vigor da vegetação em relação a umidade do solo, foi utilizado a técnica de correlação cruzada, que melhor se aplica à dados deslocados no tempo. Seu coeficiente de correlação é calculado em diferentes pontos do deslocamento sob um domínio de tempo entre as variáveis x e y , sendo o método aplicado iterativamente até achar o ponto (deslocamento) onde a correlação for atingir o valor máximo (eq. 1). No ponto de deslocamento k , cujo valor de correlação for mais alto, é designado que x tem alta correlação com y com atraso entre as variáveis de k unidades de tempo [11].

$$f * g = \frac{\sum (f_i - \bar{f})(g_{i+k} - \bar{g})}{\sqrt{\sum (f_i - \bar{f})^2} \sqrt{\sum (g_{i+k} - \bar{g})^2}} \quad (1)$$

Onde f and g são as duas funções que queremos relacionar,

k representa o valor de deslocamento em dias, \bar{f} e \bar{g} representam suas médias respectivas.

3. RESULTADOS

O resultado das correlações entre as variáveis umidade do solo e NDVI dos 24 pontos é apresentado na Tabela 1. Foi aplicado um filtro móvel menor (± 5 dias) e um maior (± 30 dias) a fim de observar se a suavização dos dados apresentaria diferenças significativas nos resultados. No fim, foi observado que os resultados de correlação se mantiveram numa diferença mínima, no entanto, os valores de decalagem apresentam diferenças em relação ao melhor tempo de resposta. Quase todos os pontos apresentaram boa correlação, com valores variando entre 0,5 e 0,7 (apenas 2 pontos apresentaram baixa correlação). Valores semelhantes foram encontrados em outros estudos analisados, e mostram que o NDVI responde bem a umidade do solo estimada pelo satélite SMOS, o que torna o produto muito válido para análise espacial de umidade do solo.

No geral, quando se tem uma boa correlação, os picos de NDVI tendem a acompanhar os picos de umidade do solo e estão relacionados aos períodos sazonais: altos para os meses mais úmidos e baixos para meses mais secos. A Figura 1 apresenta séries temporais onde são representados o NDVI e a umidade do solo. A Figura 1a representa um exemplo quando se obtêm uma boa correlação (0,7) e a Figura 1b um exemplo de fraca correlação (0,1), usando o filtro móvel de 30 dias. Para análise é considerado o período de decalagem de acordo com a Tabela 1. Na Figura 1a em que o maior pico obtido se deu num atraso de 9 dias no momento quando o NDVI teve a maior correlação com a umidade do solo.

4. DISCUSSÃO

A umidade do solo na superfície apresenta grande variação e dependência do ambiente predominante, podendo ser altamente heterogênea mesmo dentro de uma pequena área, considerando que o solo pode ganhar ou perder diretamente a umidade, devido à chuva e evapotranspiração [8]. Apesar dos sensores remotos serem usados com sucesso para estimar a umidade do solo, é uma informação que se limita a camada superficial do solo, e pode não contemplar toda a zona de extração de água pelas plantas [7]. Haverá melhor correlação quando determinada espécie de cobertura apresentar raízes mais curtas, que corresponda a camada de medição de umidade do solo pelo sensor ou quando o ambiente em si favorecer o processo de infiltração, contemplando em menor tempo a zona raiz de captação de água pela planta, em função de dias ou semanas depois, de acordo com os valores obtidos na decalagem apresentados na Tabela 1.

De acordo com [12], em áreas vegetadas, a umidade de solo na zona raiz funciona como um elo entre a fenologia e o armazenamento de água no subsolo e influencia no equilíbrio da água superficial e partição de energia devido a evapotranspiração. Portanto, a variação nas condições climáticas em várias escalas temporais, resultam no desvio temporal da umidade do solo e das condições médias a longo prazo, e esse desvio afeta a vegetação causando mudanças em

Tipo de Classe / Bioma	Pontos	Coordenadas		Correlação Média Móvel		Resposta do NDVI (dias) Média Móvel	
		Longitude	Latitude	5 dias	30 dias	5 dias	30 dias
Herbácea / Cerrado	1	-55.495767	-21.001077	0.37	0.40	7	14
	2	-46.500408	-20.237220	0.68	0.71	7	9
	3	-43.726161	-4.541553	0.65	0.69	18	18
Herbácea / Caatinga	1	-39.556569	-12.314319	0.60	0.63	9	20
	2	-39.430474	-12.377272	0.61	0.63	9	20
	3	-38.737949	-6.397683	0.63	0.66	7	6
Arbustivo / Cerrado	1	-52.601571	-15.301674	0.62	0.64	32	18
	2	-44.689320	-13.992620	0.54	0.64	44	50
	3	-45.236903	-5.932958	0.55	0.62	26	24
Arbustivo / Caatinga	1	-41.875682	-14.558145	0.62	0.69	10	22
	2	-39.225389	-9.357678	0.53	0.60	8	20
	3	-40.340911	-4.317715	0.69	0.70	8	12
Floresta / Cerrado	1	-54.694567	-20.244408	0.50	0.54	16	19
	2	-46.145950	-18.472344	0.64	0.69	37	37
	3	-44.392163	-6.052274	0.60	0.62	13	13
Floresta / Caatinga	1	-41.235153	-11.891437	0.50	0.58	8	25
	2	-39.521689	-7.262984	0.60	0.63	16	21
	3	-41.775235	-4.808175	0.73	0.75	11	14
Cultivo / Cerrado	1	-48.311926	-20.247408	0.10	0.10	46	46
	2	-46.170917	-13.200567	0.71	0.79	57	62
	3	-50.794744	-17.159109	0.63	0.66	39	45
Cultivo / Caatinga	1	-41.730003	-11.729989	0.45	0.55	10	24
	2	-39.799166	-7.473467	0.66	0.70	9	22
	3	-40.950829	-7.309138	0.58	0.61	8	21

Tabela 1: Resultado das correlações dos 24 pontos entre o NDVI e a umidade do solo do SMOS.

suas características. Uma vegetação natural pode desenvolver um certo equilíbrio dentro de uma condição climática local, ao contrário de áreas cultivadas que são totalmente refém da umidade, à exemplo da área de cultivo no Cerrado (Ponto 1, na Tabela 1), que apresentou uma fraca correlação.

O teor de água no perfil do solo é influenciado por atributos do solo como textura, mineralogia, matéria orgânica, estrutura etc. Desta forma, a cobertura do solo tem efeito significativo na distribuição de água e a textura do solo é fator determinante na dinâmica de movimentação, distribuição e armazenamento de água. Solos com maior teor de argila podem reter mais água que solos arenosos, e solos arenosos podem facilitar o processo de infiltração. Ao mesmo tempo deve-se considerar que o conteúdo de água no solo não é igual a disponibilidade de água para a planta. Embora solos argilosos possam reter mais água, as moléculas de água são fortemente ligadas as partículas de argila, difíceis de extrair pelas plantas [2].

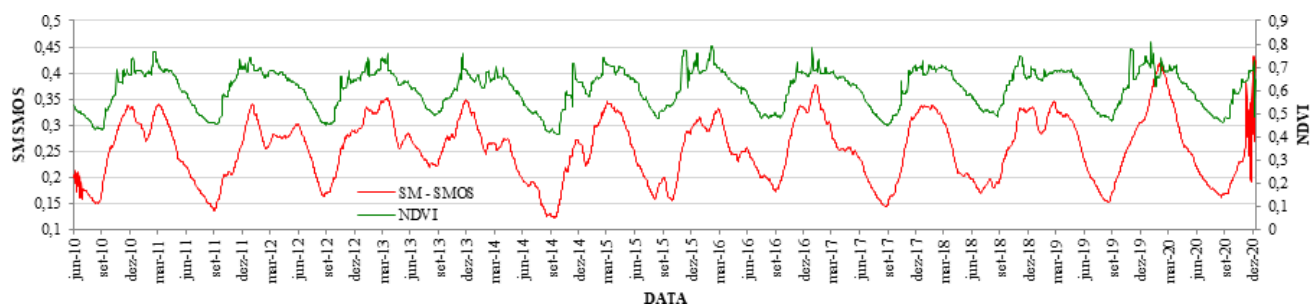
De acordo com [2], durante a estação chuvosa, quando a umidade do solo é suficiente, a mudança da umidade do solo não leva à mudança perceptível nos índices de vegetação com base na verdura ou conteúdo de água do dossel. Na estação seca, no entanto, os índices de vegetação tornam-se mais responsivos a mudanças de umidade do solo, gerando relações lineares significativas. Tal análise indica que os índices de vegetação são melhores indicadores de umidade do solo quando a água se torna um recurso limitado. Considerando o período seco dos dois biomas, é considerado neste estudo que as coberturas analisadas não são adaptadas à seca e dependem totalmente da umidade que chega e por isso apresentam altos picos do NDVI, quando há picos de umidade do solo,

mesmo que esses picos ocorram em defasagem, afinal as características do solo são também determinantes.

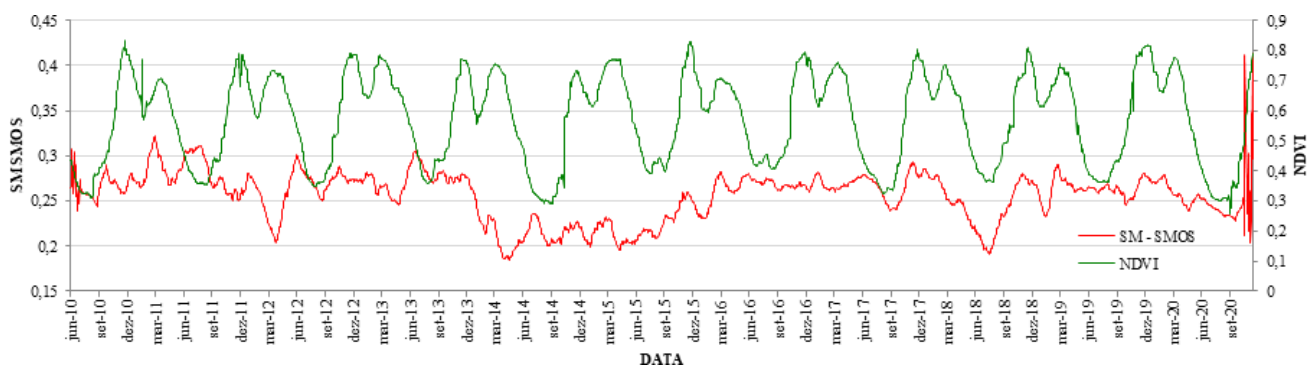
5. CONCLUSÕES

Neste estudo avaliou-se a relação entre a umidade do solo estimada pelo sensor do satélite SMOS e o NDVI do sensor MODIS, considerando uma escala temporal de dez anos, obtendo boas correlações. O tempo de atraso de resposta da vegetação em relação a umidade do solo variou de acordo com o tipo de cobertura. No geral, os pontos situados em ambientes mais secos como do Cerrado e da Caatinga apresentaram uma decalagem menor em função da umidade. É preciso avaliar as características de cada área, uma vez que a resposta tardia do NDVI às mudanças de umidade do solo é tida como sendo a mudança das condições da vegetação que é desencadeada pelo acúmulo das condições climáticas locais, dos últimos dias ou mesmo nas últimas semanas e o NDVI representa essas condições. No entanto, para algumas áreas as características do solo tendem a influenciar nos resultados, favorecendo ou não a resposta da vegetação à umidade do solo.

Os pontos que apresentaram correlação mais baixa mas onde houve mudança perceptível no NDVI, é possível identificar um padrão sazonal atribuído à resposta do NDVI associada à zona raiz de extração de água provendo das camadas mais profundas do que a umidade do solo estimada pelo sensor do SMOS. Há fatores que podem interferir no sistema solo-planta-atmosfera como as condições do relevo, o tipo do solo, volume de precipitações ou de irrigação (para



(a) área de herbácea no bioma Cerrado



(b) área cultivada no bioma Cerrado

Figura 1: Séries temporais de dados SMOS de umidade do solo junto aos dados MODIS de NDVI.

área de cultivo), evapotranspiração, além das características do tipo de cobertura. Uma análise mais aplicando um modelo de regressão multivariada entre as variáveis relacionadas com a umidade do solo, pode explicar melhor a variação entre o NDVI e a umidade do solo.

AGRADECIMENTOS: A FAPEMIG, a CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFMG pelo apoio e incentivo financeiro.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ARLENE COSTA Nascimento. *Avaliação da umidade no perfil do solo a partir de sensoriamento remoto*. Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM 049/02, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- [2] Shishi Liu, Dar A Roberts, Oliver A Chadwick, and Chris J Still. Spectral responses to plant available soil moisture in a californian grassland. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19:31–44, 2012.
- [3] T. A. Costa. *Estimativa da umidade do solo na região semiárida do Brasil pelo método do triângulo universal*. Tese de Doutorado em Sensoriamento Remoto – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos – São Paulo, 2017.
- [4] Gerard Portal, Thomas Jagdhuber, Mercè Vall-llossera, Adriano Camps, Miriam Pablos, Dara Entekhabi, and Maria Piles. Assessment of multi-scale smos and smap soil moisture products across the iberian peninsula. *Remote Sensing*, 12(3):570, 2020.
- [5] Bianca Buss Maske. *Assimilação de dados de umidade do solo derivada de satélite no modelo SSIB acoplado ao MCGA/CPTEC*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2016.
- [6] Diego César dos Santos Araújo, Suzana Maria Gico Lima Montenegro, Ana Claudia Gusmão, and D. F. Rodrigues. Validation of SMOS-IC soil moisture over brazilian semiárid using in situ measurements. *EPiC Series in Engineering*, 3:54–61, 2018.
- [7] Rafael H.V. Silva. *Comportamento espacial e temporal da umidade do solo em uma bacia hidrográfica da região sul de Minas Gerais*. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, Lavras – Minas Gerais, 2018.
- [8] Alzira Gabrielle Soares Saraiva Souza. *Índice de seca no Estado de Pernambuco utilizando dados de umidade do solo do Satélite SMOS*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Recife, PE, 2019.
- [9] Marcel Buchhorn, Bruno Smets, Luc Bertels, Bert De Roo, Myroslava Lesiv, Nandin-Erdene Tsendbazar, Martin Herold, and Steffen Fritz. Copernicus global land service: Land cover 100m: collection 3: epoch 2019: Globe. *Version V3. 0.1*[Data set], 2020.
- [10] P.A. Morettin and C.M. de Castro Toloi. *Análise de séries temporais*. ABE - Projeto Fisher. Edgard Blucher, 2006.
- [11] José Medel, Fidel Díaz, and Claudio Garcia. Estudo da correlação cruzada e da correlação múltipla dos sinais de ruído binário generalizado, 2021.
- [12] Le Wang. A multi-scale approach for delineating individual tree crowns with very high resolution imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(4):371–378, 2010.