

SAMUEL RODRIGUES DA CUNHA

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DOS SATÉLITES GRACE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Monte Carmelo, como parte das exigências para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães

**MONTE CARMELO
MINAS GERAIS - BRASIL
2021**

SAMUEL RODRIGUES DA CUNHA

ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO A PARTIR DOS SATÉLITES GRACE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agricultura e Informações Geoespaciais.

APROVADA em 31 de agosto de 2021

Banca examinadora

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães – Instituto de Geografia (UFU)

Dra. Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos – (USP)

Prof. Dr. Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis – Instituto de Geografia (UFU)

Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães
Instituto de Geografia (UFU)
(Orientador)

**MONTE CARMELO
MINAS GERAIS - BRASIL
2021**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C972 Cunha, Samuel Rodrigues da, 1997-
2021 Estimativa da evapotranspiração a partir dos satélites GRACE [recurso eletrônico] / Samuel Rodrigues da Cunha. - 2021.

Orientador: Gabriel do Nascimento Guimarães.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.505>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Agronomia. I. Guimarães, Gabriel do Nascimento, 1984-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais. III. Título.

CDU: 631

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações
 Geoespaciais
 Rodovia LMG 746, Km 01, s/nº, Bloco 1AMC, Sala 1A202, Monte Carmelo-MG, CEP 38.500-000
 Telefone: (34) 3810-1033 - ppgaig@iciag.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agricultura e Informações Geoespaciais				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico				
Data:	31/08/2021	Hora de início:	14:03	Hora de encerramento:	17:50
Matrícula do Discente:	31922AIG011				
Nome do Discente:	Samuel Rodrigues da Cunha				
Título do Trabalho:	Estimativa da Evapotranspiração a partir dos Satélites GRACE				
Área de concentração:	Informações geoespaciais e tecnologias aplicadas à produção agrícola				
Linha de pesquisa:	Aplicações e desenvolvimento de métodos em informações espaciais				

Reuniu-se na sala virtual <https://conferenciaweb.rnp.br/webconf/gabriel-do-nascimento-guimaraes> a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais, assim composta: Dra. Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos (Centro de Estudos de Geodesia - CENEGEO), Dr. Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis (UFU), Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães (UFU) – orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Gabriel do Nascimento Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/08/2021, às 19:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento

03/09/2021

SEI/UFU - 3010914 - Ata de Defesa - Pós-Graduação



no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos, Usuário Externo**, em 01/09/2021, às 08:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Bezerra de Araujo Gallis, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/09/2021, às 08:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3010914** e o código CRC **9EC558CC**.

Referência: Processo nº 23117.057822/2021-93

SEI nº 3010914

*Mesmo que eu ande pelo vale da sombra da morte, eu não
temerei a mal nenhum, porque Tu Senhor, estás
comigo.”(Salmos 23:4)*

AGRADECIMENTOS

A conclusão deste trabalho só foi possível através da colaboração de pessoas que com muita dedicação, suor e amor, deram-me forças para prosseguir, seja de forma direta ou indireta. Desde já manifesto a todos meus sinceros agradecimentos.

Agradeço, primeiramente, a Deus por seu imenso amor e cuidado junto à minha vida. Concedeu-me saúde para superar as dificuldades impostas pelo Covid, alívio quando tive dor, paz quando eu tive angústia, coragem quando eu tive medo e o amor quando achei que estava sozinho. Verdadeiramente Deus foi minha rocha e minha fortaleza.

Agradeço à minha querida avó Natália (*in memoriam*), que sempre com alto astral e amor, alegrou nossa família. Em todos os momentos nos motivou com sua energia e vontade de viver. Obrigado por tudo.

Aos meus pais, Marcelo e Margarida, minha referência de amor e de fé. Agradeço por toda educação, carinho e pelo amor incondicional que sempre destinaram a mim. Essa conquista não é apenas minha, mas é nossa. Vocês foram, são e serão eternamente a base de tudo em minha vida.

Aos meus queridos irmãos Lucas e Sara, que sempre me incentivaram a prosseguir, agradeço pela paciência e carinho. Não tenho palavras para expressar a minha gratidão.

À minha companheira de vida, minha motivadora e minha noiva, Amanda. Sou grato pela sua presença em minha vida. Agradeço por todo carinho, incentivo e paciência durante todo esse tempo. Agradeço por nunca ter me negado apoio, mesmo nas horas mais difíceis. Essa conquista é apenas mais um degrau dos muitos que estamos construindo juntos nessa jornada.

Aos meus amigos Kairon, Marco Aurélio, Pablo, Rafael e Vinícius Werneck, agradeço pelos anos de companheirismo e alegrias compartilhadas.

Aos meu orientador Prof. Dr. Gabriel Guimarães, pelo estímulo, apoio e orientação durante o mestrado. A confiança depositada em mim, e paciência durante todos estes meses, foram essenciais para que eu não desistisse durante o trajeto. Sem a sua sabedoria e mansidão, este trabalho não seria possível.

Agradeço a Dra. Ana Cristina Oliveira Cancoro de Matos por ter aceitado o convite para contribuir neste trabalho. Sua disposição e ensinamentos repassados durante o pouco tempo que nos conhecemos contribuíram efetivamente para realização desta importante etapa em minha vida.

Agradeço ao Prof. Dr. Rodrigo Gallis por ter aceitado o convite para contribuir neste trabalho. Gratidão pelos ensinamentos e incentivo durante minha vida acadêmica. Sua participação foi determinante na minha formação profissional.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais e a Universidade Federal de Uberlândia por todo o suporte a minha formação, desde os professores, técnicos e colaboradores, até os serviços responsáveis pela limpeza e manutenção do campus, que com tanta determinação, fazem da universidade o ambiente ideal para o desenvolvimento da ciência e da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG). Meus agradecimentos à FAPEMIG pela concessão da bolsa de mestrado.

BIOGRAFIA

Samuel Rodrigues da Cunha nasceu em 08 de agosto de 1997, na cidade de Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil. Graduado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Minas Gerais, Brasil em agosto de 2019. No mesmo mês ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Informações Geoespaciais da Universidade Federal de Uberlândia – Campus Monte Carmelo, onde foi orientado pelo Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães, especialista em Geodésia Física. Seus interesses de pesquisa incluem a aplicação dos satélites geofísicos GRACE para estimativa da evapotranspiração, variável hídrica fundamental no funcionamento do ciclo hidrológico.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRUDUÇÃO.....	13
1.1 Estrutura da Dissertação.....	15
1.2 Objetivos.....	17
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i>	17
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
1.3 Justificativa.....	17
2 O USO DE SATÉLITES PARA APLICAÇÕES HÍDRICAS NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO.....	19
2.1 Uso de Satélites na Agricultura Brasileira: Um Contexto Histórico.....	20
2.2 Aplicações e Utilizações de Satélite na Gestão de Recursos Hídricos na Agricultura.....	23
2.3 Um Olhar Para o Futuro.....	33
2.3.1 Planet Inc. e a Constelação de Satélites Pequenos.....	33
2.3.2 Inteligência Artificial na Agricultura.....	34
2.3.3 Satélites de Dupla-Utilidade.....	34
2.3.4 Satélites com Atuação em Tempo Real.....	35
2.3.5 Processamento a bordo.....	35
2.4 Considerações Finais.....	36
3 MISSÕES SATELITAIS.....	37
3.1 GRACE.....	37
3.2 TRMM.....	38
3.3 FLDAS.....	38
3.4 GLDAS.....	39
4 INFRAESTUTURA DE DADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS.....	40
4.1 Contextualização da Área de Estudo.....	40
4.2 Análise das Bacias em Estudo no Contexto Hidrogeológico.....	43
4.2.1 <i>Bacia Amazônica</i>	45
4.2.2 <i>Bacia do Paraná</i>	45
4.2.3 <i>Bacia do Paraguai</i>	46
4.2.4 <i>Bacia Hidrográfica do São Francisco</i>	46
4.2.5 <i>Bacia do Tocantins-Araguaia</i>	47
4.3 Informação da Disponibilidade Hídrica Divulgada Pela ANA.....	47
4.3.1 <i>Relatório de Conjuntura de 2009</i>	48
4.3.2 <i>Informe de 2010</i>	48
4.3.3 <i>Informe de 2011</i>	49
4.3.4 <i>Informe de 2012</i>	49
4.3.5 <i>Relatório de Conjuntura de 2013</i>	49
4.3.6 <i>Informe de 2014</i>	50
4.3.7 <i>Informe de 2015</i>	51
4.3.8 <i>Informe de 2016</i>	51
4.3.9 <i>Informe de 2017</i>	52
4.4 Conjunto de Dados.....	52
4.4.1 <i>Total de Água Armazenada</i>	52
4.4.2 <i>Precipitação</i>	54
4.4.3 <i>Escoamento</i>	56

4.4.4 <i>Evapotranspiração (GLDAS)</i>	57
4.5 Metodologia.....	58
4.5.1 <i>Manipulação dos Dados</i>	59
4.5.2 <i>Normalização dos Dados</i>	60
4.5.3 <i>Métodos Interpoladores</i>	61
4.5.4 <i>Estimativa da ET a partir da missão GRACE</i>	66
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1 Bacia Amazônica.....	72
5.2 Bacia Paraguai.....	76
5.3 Bacia do Paraná.....	81
5.4 Bacia do São Francisco.....	86
5.5 Bacia do Tocantins.....	91
5.6 Síntese dos Resultados.....	95
6 CONCLUSÕES.....	97
REFERÊNCIAS.....	99

CUNHA, SAMUEL RODRIGUES DA. **Estimativa da evapotranspiração a partir dos satélites GRACE**. 2021, 107p. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Informações Geoespaciais) – Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.505>

RESUMO

Muitos esforços têm sido feitos para entender a variabilidade, magnitude e padrões das variáveis climáticas e hidrológicas. Nesse sentido, as ciências cartográficas se estabelecem como ferramenta de fundamental importância no apoio ao desenvolvimento de pesquisas voltadas à agricultura e gestão ambiental, principalmente no uso de sensores orbitais, na elaboração de estudos de grande impacto, focados principalmente na compreensão de variáveis que influenciam as mudanças climáticas, como a evapotranspiração, variável diretamente relacionada ao ciclo hidrológico. Neste estudo, foi avaliado o potencial dos satélites GRACE de estimar a evapotranspiração para as regiões hidrográficas do Amazonas, Paraguai, Paraná, São Francisco e Tocantins-Araguaia. Foram utilizados para o cálculo da ET dados do total de água armazenada provenientes do GRACE, dados de precipitação da missão TRMM e escoamento nativo do FLDAS. Foram utilizadas observações da ET do modelo GLDAS como diretrizes de referência para fins de validação da ET calculada. A ET calculada apresentou superestimativas para períodos de baixa disponibilidade hídrica. As menores diferenças entre a ET calculada e do modelo se deram no mês de janeiro, mês historicamente marcado por alto volume de precipitações. As maiores correlações entre a ET calculada e do modelo GLDAS se deram para as bacias do Paraná e São Francisco, com coeficientes de correlação de 0,57 e 0,53, respectivamente. As maiores correlações entre as variáveis se deram entre o $dTWS/dt$ e precipitação, com a indicação de correlações significativas para todas as bacias em estudo. O modelo se mostrou uma alternativa para avaliação qualitativa e quantitativa da ET em períodos de alta disponibilidade hídrica.

Palavras-chave: Evapotranspiração. Recursos hídricos. Regiões hidrográficas. Satélite GRACE. Sensores Orbitais.

CUNHA, SAMUEL RODRIGUES DA. **Estimation of evapotranspiration from GRACE satellites**. 2021, 107p. Dissertation (Master's Degree in Agriculture and Geospatial Information) – Federal University of Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brazil. Available in: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2021.505>

ABSTRACT

Many efforts have been made to understand the variability, magnitude and patterns of climatic and hydrological variables. In this sense, the cartographic sciences are established as a tool of fundamental importance in supporting the development of research focused on agriculture and environmental management, mainly in the use of orbital sensors, in the elaboration of studies of great impact, focused mainly on the understanding of variables that influence climate change, such as evapotranspiration, a variable directly related to the hydrological cycle. In this study, the potential of GRACE satellites to estimate evapotranspiration for the hydrographic regions of Amazonas, Paraguay, Paraná, São Francisco and Tocantins-Araguaia was evaluated. Data from the total water storage from GRACE, precipitation data from the TRMM mission and native flow of FLDAS were used to calculate ET. Observations of the ET of the GLDAS model were used as reference guidelines for the validation of the calculated ET. The calculated ET presented overestimates for periods of low water availability. The smallest differences between the calculated ET and the model were in January, a month historically marked by a high volume of precipitation. The highest correlations between the calculated ET and the GLDAS model were for the Paraná and São Francisco basins, with correlation coefficients of 0.57 and 0.53, respectively. The highest correlations between the variables were between $dTWS/dt$ and precipitation, with the indication of significant correlations for all the basins under study. The model proved to be an alternative for qualitative and quantitative evaluation of ET in periods of high water availability.

Keywords: Evapotranspiration. Water resources. Hydrographic regions. GRACE satellite. Orbital sensors.

1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente dois terços da superfície terrestre é coberta por água em estado líquido (BLANCO, 1999). Desta totalidade, aproximadamente 97,22 % está estabelecida nos oceanos, e cerca de 2,78%, apenas, é vista sobre forma de água doce. Destes, cerca de 77,78% está disponível sob forma de águas superficiais, e 99,36% desta totalidade de águas superficiais estão contidas em geleiras (cerca de 0,64% de toda a água no globo). Apenas 0,33% de toda a água existente na superfície terrestre está disponível ao ser humano para utilização. Estes números traduzem uma das maiores preocupações recorrentes das autoridades e órgãos espalhados pelo mundo: a importância do uso racional deste bem natural (MOLDEN, 2007; SIEBERT et al., 2010).

Tundisi (1999), afirma que alterações no volume, disposição e qualidade dos recursos hídricos sinalizam uma ameaça à sobrevivência de todas as espécies do planeta, principalmente humana, com uma organização social e econômica estruturada sob a disponibilidade de água própria para o consumo, e na habilidade de proteção e armazenamento deste recurso.

A agricultura irrigada é um setor dominante quando se fala em recursos hídricos, e se mostra ainda mais forte quando comparada a outros setores de produção, como indústrias, geração de energia, mineração e aquicultura. A água na agricultura é fundamental para que a produção de alimentos possa alcançar seu maior rendimento de produção (MOLDEN, 2007; SIEBERT et al., 2010).

Porém, uma dificuldade pontual a ser solucionada consiste em se obter uma produção maior de alimentos utilizando uma quantidade inferior de água, o que hoje é visto como um grande paradigma, e pode se tornar ainda mais dificultoso se as alterações climáticas projetadas para as próximas décadas se tornarem verdadeiras (STOCKER et al., 2013).

O desempenho do sistema alimentar hoje depende mais do clima do que 200 anos atrás. Os possíveis impactos das alterações climáticas na produção alimentar tendem a ser visto com maior preocupação, principalmente em regiões onde a agricultura de sequeiro ainda é a principal fonte de alimento e renda (FAO, 2008).

Dessa forma, associada à possibilidade de alterações climáticas, outra projeção surge como fator essencial para estudos hídricos a curto e longo prazo: o contínuo crescimento da população mundial. Segundo Bos et al. (2005), as perspectivas são de que em 2050 a população mundial ultrapasse a faixa de 9 bilhões de pessoas, o que traz a necessidade real de planejamento para uso e manejo consciente deste recurso natural.

Incluso neste cenário, surge a agricultura brasileira. Com números de safras recordes, o país hoje se encontra em uma escalada para se tornar o maior produtor mundial nos próximos anos. Com áreas legalmente disponíveis e agricultáveis, clima favorável à produção durante todo o ano e com a expansão do setor tecno-científico na produção em solos a princípio inférteis, o Brasil se coloca hoje como a principal esperança da sociedade global no aumento da produção alimentícia, com o objetivo de atingir a produção necessária para atender o aumento populacional nos próximos 30 anos (DALL'AGNOL, 2020).

Dessa forma, a utilização de satélites na agricultura trouxe impacto direto ao setor produtivo no contexto regional, nacional e mundial. A capacidade de se tomar decisões apoiadas em ferramentas visuais e posicionais influenciou diretamente na forma de gestão das lavouras, impulsionando números de produtividade, reduzindo custos no ciclo produtivo e minimizando impactos ao meio ambiente através do zoneamento e aplicações localizadas. O desenvolvimento e o avanço da tecnologia em constelações de satélites, permitem maior conectividade nas cidades e no campo, e trazem a possibilidade de maior capacidade observacional. A junção destes fatores com o avanço computacional, infraestrutura de dados, análises e interpretações específicas, têm aumentado as perspectivas de uso e aplicação de sensores remotos no setor agrícola (JARMAN et al., 2018).

Neste contexto, o Sensoriamento Remoto surge como ferramenta capaz de gerar subsídios para a gestão racional de recursos hídricos nas áreas de desenvolvimento agrícola em cenários de alterações climáticas intensas e variação no uso e ocupação do solo, com o objetivo de melhorar, dessa forma, o aproveitamento da água das precipitações e minimizar os desperdícios e déficits de água, problemas estes decorrentes em várias regiões do mundo.

Com a intensa evolução no setor, a necessidade de incorporação das Tecnologias da Informação se torna imprescindível, principalmente quando se trata de capacidade de otimização e adaptação de aplicações e processos já existentes (MARTINS, 2015). O uso de imagens de satélite e plataformas para estudo e monitoramento aplicado na gestão ambiental é um exemplo de como as ciências da computação têm agregado desenvolvimento ao sensoriamento remoto.

A fim de monitorar uma das variáveis que influenciam no ciclo hidrológico, uma grande diversidade de aplicações tem sido utilizada na quantificação da evapotranspiração (ET) em recintos agrícolas de grandes proporções (ZHANG et al., 2016). Dentro destas aplicações, algoritmos como *Surface Energy Balance Algorithms for Land* – SEBAL (BASTIAANSEN, 1995; BASTIAANSEN et al., 1998a, 1998b), o *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* - METRIC (ALLEN et al., 2007) e o *Simple Algorithm*

for Evapotranspiration Recovery – SAFER (TEIXEIRA et al., 2013a), surgem como ferramentas potenciais para obtenção da ET, ambos fundamentados no balanço de energia da superfície, uma das metodologias mais utilizadas, conforme Allen et al. (2007).

Operando com objetivos diferentes ao do Sensoriamento Remoto convencional, a missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) surge como uma importante ferramenta para estudos relacionados a gestão do potencial hídrico. A missão tem sido cada vez mais utilizada em pesquisas cujo objetivo central é o monitoramento do armazenamento total da água. Lançado em 2002, é oriundo de uma parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e o DLR (*German Aerospace Center*). Segundo Long, D. et al. (2013), através de um sistema composto por dois satélites em mesma órbita, separados a uma distância de aproximadamente 200 km, o GRACE consegue estimar a variação das massas de água da superfície continental com exatidão de 1,5 cm para uma escala de 300 km.

Scanlon et al. (2015) afirma que os dados do GRACE, têm sido utilizados desde o início da missão no monitoramento de alterações no armazenamento hídrico, e em diversas outras aplicações hidrológicas, como por exemplo na validação de modelos hidrológicos (GETIRANA et al., 2014).

Seguindo esta linha, o presente trabalho surge com objetivo principal de utilizar dados da missão GRACE aliados a variáveis hidro climáticas oriundas do modelo *Global Land Data Assimilation System (GLDAS)* (RODELL et al., 2004), *Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System (FLDAS)* (MCNALLY et al., 2017) e da missão *Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)* (KUMMEROW et al., 2000) para a estimativa da evapotranspiração em superfície nas regiões hidrográficas brasileiras determinadas no estudo. A partir dessas análises, a ideia é de que se consiga validar as estimativas espaciais da ET comparando-as com os valores de ET estimadas a partir do modelo GLDAS e, conseqüentemente, determinar as potencialidades dessas ferramentas para aplicações em estudos ambientais voltados a gestão hídrica. Face ao exposto a pergunta a ser respondida nessa pesquisa é: será possível estimar valores de evapotranspiração na superfície de diferentes bacias hidrográficas no Brasil utilizando o sensor GRACE?

1.1 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é estruturada de forma a apresentar a aplicação da metodologia de estimativa da evapotranspiração, por meio do uso dos satélites GRACE para cinco das

principais bacias hidrográficas brasileiras. A ideia é de que a estrutura do texto seja direta e objetiva, apresentando elementos como introdução, objetivos, justificativa, um artigo de revisão, a apresentação das áreas de estudo, metodologia utilizada para obtenção dos resultados e a apresentação dos resultados e discussões, expondo as conclusões quanto ao uso da metodologia empregada.

O Capítulo 2, intitulado como “O uso de satélites para aplicações hídricas na agricultura: uma revisão”, busca apresentar uma revisão bibliográfica do uso dos sensores remotos orbitais na agricultura, com foco no contexto hídrico, descrevendo o processo evolutivo, exibindo aplicações no passado, no presente e expectativas quanto ao uso nas próximas décadas.

No capítulo 3, é apresentada a base teórica a respeito das missões satelitais utilizadas nesse trabalho. O Capítulo 4 apresenta as áreas de estudo deste trabalho, bem como os dados a serem utilizados no estudo, apresentando as informações e etapas essenciais na execução da metodologia proposta, expondo os processos desde a obtenção dos dados, manipulação e normalização das observáveis, até a execução, geração dos resultados e validação dos cálculos. Por fim, no Capítulo 5, são expostas as conclusões obtidas a partir dos resultados e análises realizadas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Verificar a potencialidade da missão GRACE, associado a observações dos modelos GLDAS, FLDAS e da missão TRMM como ferramentas de provimento de informações para estudos ambientais voltados à gestão hídrica e alterações climáticas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estimar a evapotranspiração em superfície nas principais bacias hidrográficas do território brasileiro utilizando dados da missão GRACE.
- Validar as estimativas espaciais da ET geradas com o uso do satélite GRACE, comparando -as com diretrizes de referência do modelo GLDAS.

1.3 Justificativa

Muitos esforços têm sido feitos com o intuito de compreender a variabilidade, magnitude e padrões das forças climáticas e hidrológicas sobre a evapotranspiração em múltiplas escalas. Estes esforços visam proporcionar um maior entendimento sobre uma variável chave dos ciclos hidrológico e do carbono e de grande influência sob os processos de mudanças climáticas e produtividade agrícola.

Desde o uso de lisímetros até aplicações de dados meteorológicos em modelos de balanço hídrico, várias são as formas de estimar a evapotranspiração hoje. No entanto, estas metodologias podem apresentar limitações como falta de dados e pequena abrangência espacial de dados, o que culmina em aplicações em cenários locais. Tais fatores limitantes motivaram a elaboração deste trabalho, baseado no uso de dados nativos de sensores orbitais, os quais trazem facilidade na aquisição de dados e possibilitam uma abrangência de informações em escalas regionais.

Com isso, os sensores orbitais surgem como ferramenta potencial na obtenção de dados de variáveis hidrológicas e climáticas, possibilitando a aquisição de informações essenciais para a compreensão do comportamento espaço temporal do ciclo hidrológico e de fenômenos climáticos, tornando possível análises que visem o entendimento de como a evapotranspiração se relaciona com estas variáveis, e de como os satélites GRACE podem ser utilizados na quantificação e dimensionamento de variáveis hidrológicas em estudos hidroclimáticos.

2. O USO DE SATÉLITES PARA APLICAÇÕES HÍDRICAS NA AGRICULTURA: UMA REVISÃO

As informações geoespaciais trazem uma abordagem mais inclusiva ao setor agrícola, abrangendo desde o grande ao pequeno produtor, oferecendo recursos e metodologias que permitem a recuperação de práticas antigas de manejo de forma ainda mais assertiva. As variabilidades presentes no campo, que hoje podem ser observadas e definidas através de zonas de gestão localizada mesmo em pequenas áreas de cultivo, podem ser explicadas através da aprendizagem adquirida ao longo da história (MOLIN et al, 2015).

Observa-se um aumento gradativo na escassez de recursos naturais, aumento este motivado pela crescente busca por energia e por produtos oriundos da agricultura. Objetivando a segurança alimentar e o apoio às causas sustentáveis, o setor agrícola tem buscado a otimização do sistema produtivo, operando a gestão da lavoura com a quantidade mínima de aplicações de insumo e maior produtividade da cultura. Esta linha de atuação, faz a Agricultura de Precisão adquirir mais adeptos, aproximando o desenvolvimento tecnocientífico ao campo. (MOLIN et al, 2015).

O desenvolvimento e o avanço da tecnologia em constelações de satélites, permitem maior conectividade nas cidades e no campo, e trazem a possibilidade de maior capacidade de monitoramento e de obtenção de dados. A junção destes fatores com o avanço computacional, infraestrutura de dados, análises e interpretações específicas, tem aumentado as perspectivas de uso e aplicação de sensores remotos no setor agrícola (JARMAN et al., 2018). Embora esse fato traga novas possibilidades de contribuição na prestação de serviços, geração de produtos e tomada de decisões no setor agrícola, ele apresenta também um desafio em garantir que as soluções tecnológicas mais recentes estejam adequadamente ligadas à capacidade de produção, sendo assim usadas para oferecer os ganhos necessários para suprir as necessidades econômicas, políticas, sociais e ambientais.

Utilizada como metodologia de suporte na gestão agrícola baseada na variabilidade espacial dos elementos que exercem influência na produtividade das lavouras, os sensores orbitais trazem hoje maior capacidade e facilidade na elaboração de análises espacializadas para o subsídio em tomadas de decisão no manejo agrícola. Com isso, produtos originados de sensores de baixa resolução espacial têm sido cada vez mais aplicados em estudos climáticos, como avaliação da temperatura dos oceanos em escala global, no monitoramento de eventos como *El Niño* e *La Niña* e na elaboração de modelos de previsão meteorológica e climatológica (SHIRATSUCHI et al, 2014).

Outro fator de inovação no campo, é a inserção de metodologias baseadas em análises temporais por índices vegetativos, as quais são cada vez mais utilizadas no âmbito das atividades agrícolas. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) está entre os mais comumente aplicados. Esse, por exemplo, traz a possibilidade de identificação do comportamento dinâmico da vegetação em diferentes escalas temporais, o que traz uma compreensão maior de ciclos fenológicos de curta e longa duração e conseqüentemente possibilita interpretar as dinâmicas de transição no uso do solo (BRADLEY et al.,2007).

2.1 USO DE SATÉLITES NA AGRICULTURA BRASILEIRA: UM CONTEXTO HISTÓRICO

Os sensores remotos são definidos pela aquisição de informações de um determinado corpo de estudo, de forma a não haver contato físico direto com o mesmo. Esse termo comumente é associado aos sensores imageadores, porém o sensoriamento remoto não se limita apenas ao produto por imagem. Eles podem ser classificados em 2 grupos: passivos ou ativos. Os sensores passivos atuam com a energia eletromagnética refletida ou emitida por um determinado corpo alvo como, por exemplo, a radiação solar refletida. Esta classe é representada por sensores imageadores, como os sensores multiespectrais a bordo de satélites como Landsat 8 e os satélites TERRA e AQUA. Já a classe dos sensores ativos possui sua própria fonte de energia eletromagnética. Tal como as aplicações por radares, sonares, sensores ativos de dossel (*Crop Circle* e *Greenseeker*) e o próprio sistema LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Este último sistematizado através do disparo de pulsos de laser sobre o relevo, trazendo a possibilidade de identificação de pontos no terreno e respectiva geração de nuvem de pontos (SHIRATSUCHI, 2014).

Analisando o processo evolutivo, pode se constatar que as medições iniciais através dos sensores remotos foram executadas por meio de câmeras embarcadas em balões, aeronaves, pipas e até mesmo, aves. Atualmente, grande parte desse campo de estudo são de dados orbitais, que se encontram a longas distâncias da superfície terrestre (SHIRATSUCHI, 2014).

Em um contexto nacional, na década de 1960, a inserção de satélites meteorológicos e de imageamento fez com que o GOCNAE (Grupo de Organização da Comissão Nacional de Atividades Espaciais – embrião do que viria a ser o INPE), expandisse suas áreas de atuação. Um grande movimento de ampliação e expansão das atividades científicas e de utilização de dados e imagens de satélites meteorológicos foi iniciado pelo INPE, obtendo inúmeros produtos baseados em dados e imagens de sensores acoplados a bordo dos satélites GOES (*Geostationary*

Operational Environmental Satellite), NOAA (*National Oceanic & Atmospheric Administration*), ambos norte-americanos, e METEOSAT (*Meteorological Satellite*) da União Europeia (INPE, 2017).

Com a finalidade de avançar nas pesquisas de aplicação de dados e imagens de satélite, foram criados dois projetos, que merecem destaque. O primeiro deles com origem no ano de 1966, denominado Programa Meteorologia por Satélite (MESA), fundamentado na recepção de imagens meteorológicas obtidas por satélite da série *Environmental Science Services Administration* (ESSA), o qual posteriormente viria a ser intitulado NOAA, missão conduzida pela NASA. A partir desse momento, o INPE potencializou a capacitação de especialistas para atuarem com a recepção e utilização de dados, tecnologia que a posteriori, seria difundida na indústria nacional, através do fornecimento de unidades a instituições como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e empresas privadas (INPE, 2017).

Outro projeto de grande impacto, com início em 1969, intitulado de “Projeto Sensoriamento Remoto” (SERE) envolveu a capacitação por profissionais americanos para a execução de campanhas de mapeamento de recursos naturais em território brasileiro através do uso de imagens aéreas da missão *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS), que posteriormente daria origem à série LANDSAT. A primeira experiência com aplicação em sensoriamento remoto diretamente na agricultura surge em 1970, com a realização da “Missão Ferrugem”, na qual o principal objetivo foi a detecção de ferrugem nos cafezais na região de Caratinga, município localizado no Vale do Rio Doce, interior de Minas Gerais. A partir de 1974, todo o foco da utilização das imagens LANDSAT é convertido no mapeamento e caracterização de áreas de desmatamento na Amazônia (INPE, 2017).

Com a expansão do Projeto SERE, logo no início dos anos 1970, o Brasil passou a ser o terceiro país no planeta a adquirir imagens do satélite LANDSAT-1, iniciativa essa que motivou a obtenção de recursos nos 1980, e permitiu a obtenção de dados espaciais dos satélites SPOT (*Satellite Pour l’Observation de La Terre*) e ERS-1 (*Earth Resource Satellite*) (INPE, 2017).

Em 1984, o INPE, juntamente com o Ministério da Ciência e Tecnologia e o Ministério das Relações Exteriores, começa a estruturar uma parceria com a China, em busca de cooperação no desenvolvimento, fabricação, testes e lançamento de dois satélites imageadores de grande porte. A parceria também compreendia as fases de operação, recepção, processamento e dispersão das imagens por estações brasileiras e chinesas. O protocolo de cooperação entre os dois países só foi assinado em 1988, o qual sucedeu o lançamento do primeiro satélite CBERS, em 1999 e posteriormente do CBERS-2, em 2003. Com o sucesso da

missão, a cooperação foi renovada, o qual resultou no lançamento do CBERS-2B em 2007 e expansão da missão com mais dois satélites, sendo CBERS-3 e CBERS-4, respectivamente (INPE, 2017).

No entanto, é importante ressaltar que o uso de satélites na agricultura não se limita apenas ao uso de sensores imageadores e meteorológicos. Vale destacar o sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*). No contexto histórico, os primeiros avanços tecnológicos surgiram a partir do lançamento do NAVSTAR-GPS (*NAVigation Satellite with Time And Ranging - Global Positioning System*), com início no ano de 1978 nos Estados Unidos e, declarado operacional em 1995 (KUMAR e KEVIN, 2002). Da mesma forma, a extinta União Soviética lançou o primeiro satélite de seu sistema, intitulado de GLONASS, em 1982 (MONICO, 2008). A partir de então, os sistemas de posicionamento possibilitaram o levantamento de informações pedológicas e climatológicas com precisão jamais conhecida.

A implementação de tecnologia embarcada em veículos representou também um importante marco na evolução das máquinas agrícolas na década de 1980. Paralelamente, softwares de desenhos computacionais e de visualização de imagens orbitais advindas de satélites se encontravam em processo de desenvolvimento para interfaces gráficas de alta performance para a época. Embora o processo evolutivo do sistema de posicionamento se iniciou em 1978, com o lançamento do primeiro satélite GPS, a primeira aplicação na agricultura só viria a partir da década de 90, com a elaboração do “primeiro mapa de produtividade oriundo de um monitor de rendimento vinculado ao GPS” (INAMASU e BERNARDI, 2014).

Um fator de grande impacto na utilização de receptores para posicionamento como ferramenta de apoio na agricultura, foi a desativação da degradação do sinal GPS (intitulada Disponibilidade Seletiva), em maio de 2000. Essa degradação era provocada intencionalmente pelo governo americano, causando um erro exagerado (da ordem de dezenas de metros) no posicionamento oriundo do sinal GPS de uso civil. Com isso, altos investimentos eram necessários em sistemas de correção diferencial para os profissionais que atuavam na área, o que, por consequência, aumentava os custos funcionais. Este fato proporcionou uma melhora de aproximadamente 10 vezes na precisão proporcionada pelo GPS (MONICO, 2008) e fez com que o uso de receptores de navegação, se tornasse, desde então, cada vez maior.

2.2 APLICAÇÕES E UTILIZAÇÃO DE SATÉLITES NA GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA AGRICULTURA

Com números de safras recordes, o Brasil hoje se encontra em uma escalada para se tornar o maior produtor mundial nos próximos anos. De acordo com as estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a safra brasileira de grãos, cereais e leguminosas deve atingir o recorde de 264,5 milhões de toneladas em 2021. Desta maneira, a produção deve superar em 4,1% a de 2020, que totalizou 254,1 milhões de toneladas. (IBGE, 2021).

Com áreas legalmente disponíveis e agricultáveis, clima favorável à produção durante todo o ano e com a expansão do setor tecnocientífico na produção em solos a princípio inférteis, o Brasil se coloca hoje como a principal esperança da sociedade global no aumento da produção alimentícia, com o objetivo de atingir a produção necessária para atender o aumento populacional nos próximos 30 anos (DALL'AGNOL, 2020).

Para chegar à posição atual no cenário mundial, o avanço tecnocientífico tem sido imprescindível juntamente aos aspectos logísticos e de gestão, fundamentais hoje para que se tenha desenvolvimento em um mercado globalizado e competitivo. Este fato apenas reitera a necessidade de que a atualização tecnológica deve ser contínua (EPIPHANIO, 2017).

Desta forma, a utilização de satélites na agricultura trouxe impacto direto ao setor produtivo no contexto regional, nacional e mundial. A capacidade de se tomar decisões apoiadas em mapas, ferramentas climáticas e posicionais influenciou diretamente na forma de gestão das lavouras, impulsionando números de produtividade, reduzindo custos no ciclo produtivo e minimizando impactos ao meio ambiente através do zoneamento e aplicações localizadas.

No entanto, a expansão agrícola e a busca por uma maior produção alimentícia traz consigo fatores que merecem ser cuidadosamente observados. O que deve ser observado é um aumento gradativo na escassez de recursos naturais, aumento este motivado pela crescente busca por energia e por produtos oriundos da agricultura. Objetivando a segurança alimentar e o apoio às causas sustentáveis, o setor agrícola tem buscado a otimização do sistema produtivo, operando a gestão da lavoura com a quantidade mínima de aplicações de insumo e maior produtividade da cultura. Esta linha de atuação faz o uso de geotecnologias na agricultura ganhar cada vez mais seguidores, aproximando o desenvolvimento tecnocientífico ao campo (MOLIN et al., 2015).

Um exemplo disso, são os produtos originados a partir de sensores de baixa resolução espacial. Eles são cada vez mais aplicados em estudos climáticos, como avaliação da

temperatura dos oceanos em escala global, no monitoramento de eventos como *El Niño* e *La Niña* e na elaboração de modelos de previsão meteorológica e climatológica (SHIRATSUCHI et al, 2014), fenômenos estes de alto impacto no ciclo produtivo das culturas.

Todavia, um desafio pontual a ser solucionado consiste em se obter uma produção maior de alimentos utilizando uma quantidade inferior de água, o que é visto como um grande paradigma, e pode se tornar ainda mais dificultoso se as alterações climáticas projetadas para as próximas décadas se tornarem verídicas (STOCKER et al.,2013). Baseado nas limitações que este fato traz ao cenário produtivo, uma nova vertente do uso das geotecnologias vem sendo aplicada cada vez mais nos âmbitos de pesquisa e mercado: o uso de satélites como ferramenta de suporte na gestão hídrica agrícola.

Neste contexto, os sensores orbitais surgem como ferramentas capazes de gerar subsídios para a gestão racional de recursos hídricos nas áreas de desenvolvimento agrícola em cenários de alterações climáticas intensas e variação no uso e ocupação do solo, com o objetivo de melhorar, dessa forma, o aproveitamento da água das precipitações e minimizar os desperdícios e déficits de água, problemas estes decorrentes em várias regiões do mundo.

Com a intensa evolução no setor, a necessidade de incorporação das Tecnologias da Informação se torna imprescindível, principalmente quando se trata de capacidade de otimização e adaptação de aplicações e processos já existentes (MARTINS, 2015). Compreende-se que averiguar tendências ao longo do tempo e o comportamento temporal dos recursos hídricos armazenados em regiões hidrográficas brasileiras são informações relevantes para extrair a máxima eficiência na utilização desse bem natural que impacta diretamente no fornecimento à agricultura, sociedade e produção industrial (ROSENHAIM et al., 2018.)

Hoje, as observações temporais por meio de satélites artificiais solidificam ainda mais um conjunto de aparatos investigatórios prontos para auxiliar no monitoramento e estudo dos recursos hídricos, sendo desta maneira, aplicadas em diversas regiões do planeta (ROSENHAIM et al., 2018).

A fim de monitorar uma das variáveis que influenciam diretamente no ciclo hidrológico, uma diversidade de aplicações é utilizada na quantificação da evapotranspiração (ET) em recintos agrícolas de grandes proporções (KUSTAS e NORMAN, 1996; ZHANG et al., 2016). Dentro destas aplicações, algoritmos como SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithm for Land*), METRIC (*Mapping Evapotranspiration at high Resolution using Internalized Calibration*) (Figura 1) e o SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Recovery*) surgem como ferramentas potenciais para obtenção da ET, ambos fundamentados no balanço de energia da superfície, uma das metodologias mais utilizadas, conforme Allen et al. (2007).

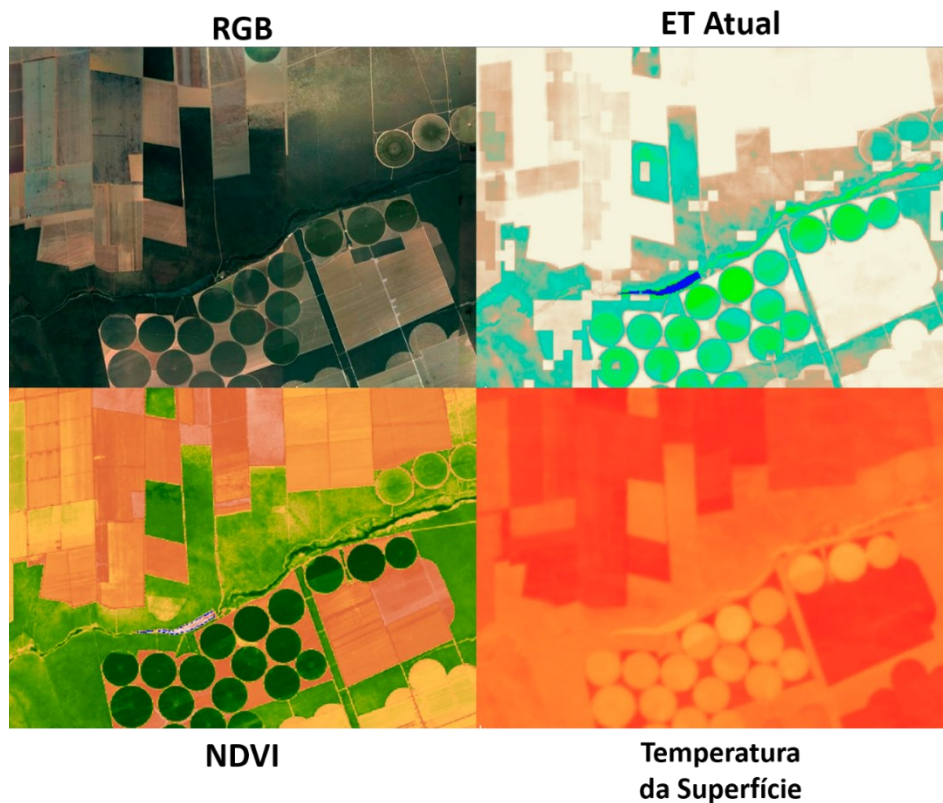


FIGURA 1. Produtos gerados pela aplicação METRIC EEFLUX (RGB, ET Atual, NDVI e Temperatura da Superfície).

Operando com objetivos diferentes aos do Sensoriamento Remoto convencional, a missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) surge como uma importante ferramenta para estudos relacionados a gestão do potencial hídrico. A missão é utilizada em pesquisas cujo objetivo central é o monitoramento do armazenamento total de água. Lançado em 2002, é oriundo de uma parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e o DLR (*German Aerospace Center*). Segundo Long’D et al. (2013), a análise dos sinais dos satélites GRACE permite estimar a variação das massas de água da superfície continental com exatidão de 1,5 cm para uma escala de 300 km, através de um sistema composto por dois satélites em mesma órbita, separados a uma distância de aproximadamente 200 km.

Entre outras aplicações empregando a missão GRACE, podemos destacar os mapas gravimétricos da Terra, que fornecem informações a respeito do comportamento do total de água armazenada ou “*Total Water Storage*” (TWS), compostos pelo conjunto de águas subterrâneas, superficiais e umidade do solo, conforme aplicações apresentadas sobre território brasileiro, entre eles: Getirana (2016), na qual utiliza dados da missão GRACE com o intuito de identificar e quantificar os impactos da prolongada seca que afetou o Sudeste e Nordeste brasileiro de 2012 a 2015, oferecendo estimativas de áreas impactadas e escassez de água

específicas da região (ROSENHAIM et al., 2018). A Figura 2 apresenta o produto do total de água armazenada para todas as regiões hidrográficas brasileiras, para o ano de 2010.

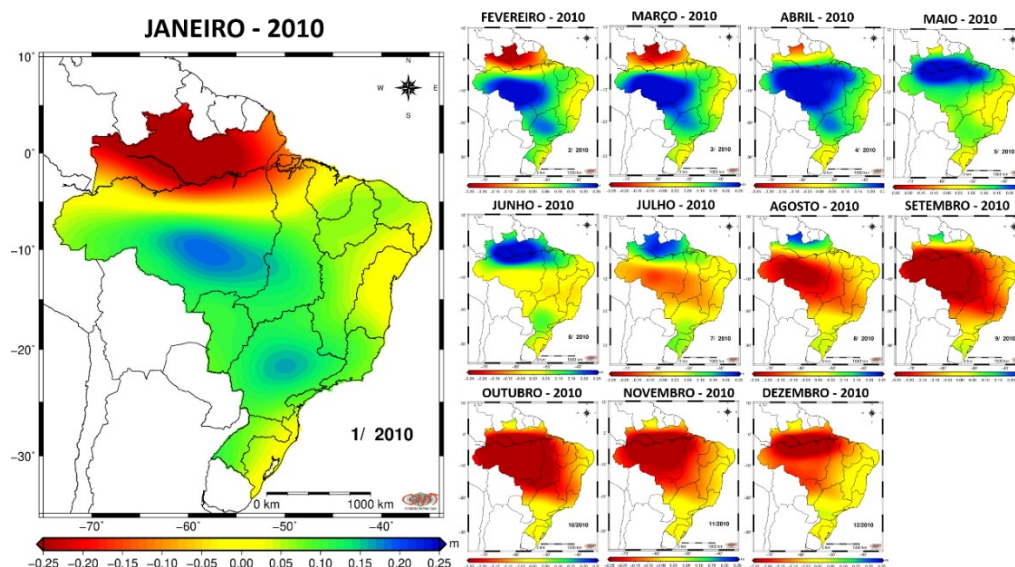


FIGURA 2. Total de Água Armazenada obtida através da missão GRACE para as regiões hidrográficas brasileiras, dos meses de janeiro a dezembro do ano 2010.

Importante destacar, também, a capacidade de aquisição de informações resultantes de satélites artificiais, como é o caso da precipitação fornecida pelo TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) por meio do *rainfall product* (3B43), complemento para análises hidrográficas temporais (ROSENHAIM et al., 2018). A missão TRMM é produto de uma parceria entre os EUA e o Japão. Lançado a bordo do veículo espacial H-II F6 no dia 28 de novembro de 1997, em Tanegashima, o produto do TRMM é um algoritmo que concatenou dados de vários sensores orbitais, resultando então em dados de precipitação global (HUFFMAN., 2007). A missão encerrou o processamento de dados no ano de 2019 (LEVIZZANI et al., 2020). Analisando a proposta desta missão de um modo mais amplo, a grande vantagem é o recobrimento dos dados, o qual atuou até mesmo em locais com baixa densidade de redes de estações meteorológicas.

Faz-se importante citar que as observações amostrais in situ disponíveis nas estações pluviométricas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e ANA (Agência Nacional de Águas) são um complemento fundamental para legitimar os produtos obtidos por satélites (ROSENHAIM et al., 2018).

Outro fator de inovação no campo, é a inserção de metodologias baseadas em análises temporais por índices vegetativos, as quais tem sido cada vez mais aplicadas nas atividades agrícolas. O índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) está entre os mais

comumente aplicados. O índice permite a possibilidade de identificação do comportamento dinâmico da vegetação em diferentes escalas temporais, o que traz uma compreensão maior de ciclos fenológicos de curta e longa duração e consequentemente possibilita interpretar as dinâmicas de transição no uso do solo (BRADLEY et al.,2007). Silveira et al., (2015), por exemplo, traz uma aplicação do índice NDVI voltada ao potencial hídrico foliar. No estudo, os autores investigaram as correspondências entre os índices de vegetação e o potencial hídrico foliar de cafeeiro irrigado e de sequeiro. Através deste estudo, baseado na análise estatística por correlação de Pearson, constataram que o NDVI demonstrou correlação positiva com o potencial hídrico foliar dos cafeeiros em sistema de cultivo sequeiro. Entretanto, não foi verificada correlação significativa para o cultivo irrigado.



FIGURA 3. O NDVI está entre os índices vegetativos mais empregados em estudos voltados à análise de vigor vegetativo, umidade do solo e potencial hídrico foliar.

Tratando-se de aplicações no contexto da gestão hídrica, baseadas em metodologias de imageamento e geração de índices vegetativos, o SETMI (*Spatial Evapotranspiration Modeling Interface*) surge como uma grande revolução na forma de gestão dos recursos hídricos na irrigação por pivô central. A pesquisa é liderada pelo grupo de pesquisa *Water For Food*, da Universidade de Nebraska. O algoritmo utiliza modelos de balanço de energia e balanço hídrico do solo, o que possibilita a modelagem da ET, o que, por sua vez, viabiliza a utilização na prescrição de eventos de irrigação. O principal objetivo é a geração da VRI (*Variable Rate*

Irrigation) ou Irrigação em Taxa Variável. Na Figura 4, é possível observar os produtos de entrada no Modelo SETMI, o qual retorna ao usuário a recomendação da Irrigação em Taxa Variável.

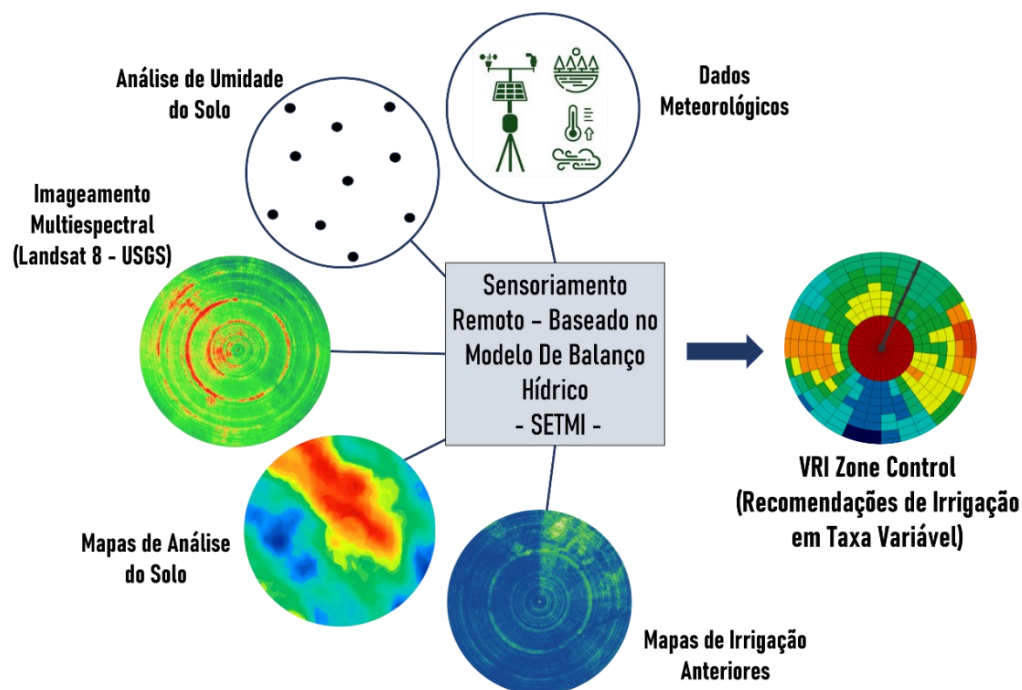


FIGURA 4. Metodologia do Modelo SETMI, que através de produtos de sensores orbitais, possibilita a geração de recomendações de irrigação em taxa variável em pivô central. Fonte: Adaptado de Neale, 2018.

A possibilidade de trazer um cenário heterogêneo a um sistema de irrigação por pivô central, apresentando a variabilidade e aplicando a real necessidade de compensação hídrica da cultura para cada bloco, gera expectativas de que a metodologia reduza de forma significativa o uso de água em culturas irrigadas.

De maneira geral, a aplicação de sensores orbitais na gestão de recursos hídricos na agricultura tem se tornado imprescindível no planejamento e racionalização do uso da água. Com o objetivo de mostrar a variabilidade de aplicações de satélites na gestão de dados hidroclimáticos no campo, foi elaborada a Tabela 1, em que pode ser observada a relação de sensores e projetos com atuação na obtenção de dados que direta ou indiretamente, impactam no ciclo hidrológico e, conseqüentemente, na capacidade produtiva na agricultura.

TABELA 1. Sensores orbitais com atuação na aquisição de dados hidro climáticos aplicados à agricultura.

Sensor(es)	Variáveis Mensuradas	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Site para Informações
SENSORES IMAGEADORES				
Sentinel 1/B Sentinel 2	Detecção e delimitação de corpos hídricos/ Evapotranspiração / Temperatura da Superfície / Recarga do Aquífero / Estresse hídrico / Monitoramento da Qualidade da Água de Reservatórios / Umidade / Quantificação de Pivôs Centrais	0,25 – 30 m	6 – 12 dias	https://sentinel.esa.int/web
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) Aqua/Terra	Qualidade da Água Superficial/ Temperatura da Superfície/ Fração da Máscara de Nuvem/ Temperatura máxima de Nuvem/ Vapor D'Água Próximo ao Infravermelho/ Vapor de Água Precipitável / Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Evapotranspiração / Estresse Hídrico / Umidade	500 m	1 – 2 dias	https://modis.gsfc.nasa.gov/
Landsat 5,7 e 8	Evapotranspiração/ Temperatura da Superfície / Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Estresse Hídrico / Quantificação de Pivôs Centrais / Umidade / Produtividade da Água em Bacia / Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Umidade do Solo	30 m	16 dias	https://landsat.gsfc.nasa.gov/
Planet	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos /Quantificação de Pivôs Centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Estresse Hídrico	3-3,9 m	1-3 dias	https://www.planet.com/
WorldView-1,2,3 e 4	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Evapotranspiração / Umidade / Temperatura da Superfície	0,31 - 0,46 m	1 – 3 dias	https://worldview.earthdata.nasa.gov/
Pleiades 1A e 2A	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Validação da Turbidez da Água	0,50 m	26 dias	https://pleiades.cnes.fr/
KompSat-3 e 3A	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios	0,55 – 0,7 m	28 dias	https://eos.com/find-satellite/kompsat-3-3a/

...continua...

TABELA 1, Cont.

QuickBird	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Evapotranspiração / Estresse Hídrico / Temperatura da Superfície	0,65 m	1-3, 5 dias	https://resources.maxar.com/data-sheets/quickbird
Gaofen-2	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios	0,80 m	5 dias	https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/gaofen-2
TripleSat	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios	0,80 m	Diária	https://www.21at.sg/product-services/triplesat-constellation
IKONOS	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Umidade /Estresse Hídrico / Modelo Digital de Elevação / Temperatura de Superfície /Evapotranspiração / Estresse Hídrico	0,82 m	1-3 dias	http://www.geoeye.com
SkySat-1 e 2	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios	0,80 m	4-5 dias	https://earth.esa.int/eogateway/missions/skysat
TerraSAR-X	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Modelo Digital de Elevação	0.25-40 m	11 dias	https://terrasar-x-archive.terrasar.com/.
SPOT-6 e 7	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios/ Detecção e Previsão de Fenômenos Climatológicos / Estresse Hídrico/ Umidade	1,5 m	1-3 dias	https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot/
SuperView-1	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios	0,5 m	2 dias	https://eos.com/find-satellite/superview-1/
CBERS-1, 2, 2B, 3, 4 e 04A	Detecção e Delimitação de Corpos Hídricos / Quantificação de pivôs centrais/ Monitoramento de Volume D'água em Reservatórios / Fenômenos de Alteração da Temperatura da Superfície	5-40 m	26 dias	http://www.cbers.inpe.br/

...continua...

TABELA 1, Cont.

SENSORES METEOROLÓGICOS				
JPSS (Joint Polar Satellite System)	Monitoramento de Condições Atmosféricas/ Temperatura da Superfície /Desenvolvimento de Nuvens / Precipitação / Temperatura Atmosférica / Vapor D'água/	-	Diária	https://www.jpss.noaa.gov/
METEOSAT	Monitoramento do clima/ Previsões meteorológicas / Vapor D'água / Formação e Desenvolvimento de Nuvens / Temperatura da Superfície	2,5 km	30 minutos	https://www.eumetsat.int/
GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites)	Fenômenos Atmosféricos / Formação e Desenvolvimento de Nuvens / Temperatura da Superfície / Vapor D'água / Sondagens da Estrutura Vertical da Atmosfera / Vapor Contido na Atmosfera / Previsões Meteorológicas	1 km	30 minutos	https://www.goes.noaa.gov/
MERRA Model e MERRA-2 Model	Total de vapor d'água/ Perfil de água no solo/ Perda de conversão de água da nuvem/ Total de água precipitável/ Camada superficial de água no solo/ Fluxo de energia em águas abertas/ Taxa de infiltração de água no solo	0.5° -0.667° (MERRA) 0.5°-0.625° (MERRA-2)	Mensal	https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/ https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/
GLDAS (Global Land Data Assimilation System)	Evapotranspiração/ Umidade do Solo/ Evaporação da água do dossel/ Temperatura do Solo/ Escoamento de Água Subterrânea/ Precipitação da Chuva/ Água Superficial do Dossel da Planta/ Vapor de Água Precipitável	0.25° x 0.25° 1° x 1°	Mensal	https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas
NLDAS (North American Land Data Assimilation System)	Evapotranspiração/ Umidade do solo/ Escoamento Superficial e Subsuperficial	0.25° x 0.25°	Mensal	https://ldas.gsfc.nasa.gov/
NCA-LDAS (National Climate Assessment - Land Data Assimilation System)	Evapotranspiração/ Taxa de Água Irrigada	1.25° x 1.25°	Diário	https://ldas.gsfc.nasa.gov/nca-ldas
FLDAS (Famine Early Warning Systems Network -FEWS NET/ Land Data Assimilation System)	Evapotranspiração Total/ Umidade Específica/ Escoamento Subterrâneo/ Fluxo de Calor do Solo/ Escoamento Superficial/ Fluxo de Calor Latente/ Fluxo de Chuva/ Temperatura do Solo	0.1° x 0.1°	Mensal	https://ldas.gsfc.nasa.gov/fldas

...continua...

TABELA 1, Cont.

TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission)	Precipitação/ Nuvem de Água Líquida / Quantificação do Vapor D'água, / Intensidade da Precipitação na Atmosfera / Mapeamento Tridimensional de Estruturas de Tempestades	0.25° x 0.25° 0.50° x 0.50°	91 minutos	https://trmm.gsfc.nasa.gov/
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	Classificação de Nuvens / Temperatura da Superfície / Modelo Digital de Elevação	15 m	16 dias	http://asterweb.jpl.nasa.gov/
RADAR				
AMSR-E	Modelo de Balanço Hídrico	25 km	Diário	https://aqua.nasa.gov/
AIRS	Coluna Total do Vapor D'água Massa de Vapor D'água na Superfície	1°	Diário	https://airs.jpl.nasa.gov/
SENSORES GRAVIMÉTRICOS				
GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)	Armazenamento de Água Subterrânea/ Monitoramento de Secas / Estimativas de Fluxos de Água / Modelagem Hidrológica / Evapotranspiração	1° x 1°	Mensal	https://grace.jpl.nasa.gov/
GOCE (Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)	Armazenamento de Água Subterrânea	1° x 1°	Mensal	https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/GOCE

2.3 UM OLHAR PARA O FUTURO

O sistema de produção de alimentos e a agricultura moderna vêm se encontrando frequentemente sob pressões externas, motivadas pelas mudanças climáticas, baixa disponibilidade hídrica e, recentemente, uma pandemia que impactou diretamente em grande parte dos setores da sociedade. Tais condições se traduzem em ameaça ao equilíbrio ambiental e econômico dos sistemas produtivos. Mesmo com inovações e avanços no setor biotecnológico e genético nas últimas décadas, a avaliação em escala ainda possuía carências e deficiências que até recentemente não eram supridas. No entanto, com os recentes avanços no Sensoriamento Remoto e nas ferramentas computacionais, como a Inteligência Artificial (IA), com a possibilidade de quantificação, zoneamento e integração de sistemas como o *big data* em ferramentas com capacidade preditiva e prescritiva, fazem com que o sistema de produção agrícola alcance resultados cada vez mais expressivos. Este fato, coloca as inovações tecnocientíficas numa posição de fundamental importância na agricultura, para que a produção de alimentos seja suficiente no objetivo de atender o aumento da demanda projetada para as próximas décadas, em decorrência do crescimento populacional e reforça cada vez mais a necessidade de evolução tecnológica, constante na indústria de sensores remotos integrados a sistemas computacionais (JUNG et al., 2021).

2.3.1 Planet Inc. e a constelação de satélites pequenos

Até o princípio da década passada, os satélites eram construídos de forma a pesar toneladas, o que exigia uma complexa organização para o lançamento à órbita. Porém, esta situação tem mudado a partir do surgimento dos nano satélites. A Planet Labs Inc. trabalha no desenvolvimento de satélites em miniatura chamado DOVES, que fazem a varredura contínua da superfície terrestre e estruturam uma constelação de satélites que fornecem uma imagem completa da Terra diariamente, com resolução espacial de 3 a 5 m. (NAGEL, et al., 2020). No total, são mais de 130 nano satélites, com peso de até 5 quilos cada satélite, que fornecem uma cobertura de toda a superfície da Terra, monitorando mais de 300 milhões de quilômetros quadrados por dia (ASNER et al., 2017).

A empresa americana Planet é até, o presente momento, a única empresa a oferecer esse imageamento diário de toda a superfície terrestre no mundo com resoluções espaciais tão detalhadas. As imagens do planeta são disponibilizadas de forma online e algumas estão acessíveis sob uma política de dados abertos (PLANET, 2018a).

A obtenção de imagens diárias do planeta pode revelar padrões e até mesmo alterações bruscas no estoque e disponibilidade hídrica, o que é de suma importância para o monitoramento e gestão de recursos e infraestrutura, além do papel fundamental na agricultura, possibilitando a obtenção de informações de relevância para otimização do setor produtivo e crescimento sustentável (JARMAN et al., 2018).

A tendência é que os nano satélites ganhem cada vez mais espaço no mercado, visto seu baixo custo e curto ciclo de produção, características que tornam as constelações destes pequenos satélites acessíveis e, conseqüentemente, resulta na ampliação da frequência de imagens de alta resolução visando o sensoriamento remoto de observação da Terra para o monitoramento de processos dinâmicos. Dentro disso, novas missões de nano satélites vêm sendo propostas para lidar com aplicações específicas, como desastres naturais, ou para testar melhorias na resolução espacial, temporal e radiométrica destes satélites. A combinação, sem precedentes, de alta resolução espacial e temporal oferecida pelas constelações de nano satélites, associada a esforços de melhoria na qualidade do sensor é promissora e pode representar uma tendência das agências espaciais, universidades e empresas privadas de substituição de grandes satélites por satélites menores e mais baratos (NAGEL, et al., 2020).

2.3.2 Inteligência Artificial na Agricultura

As aplicações de IA na agricultura estão se tornando cada vez mais sólidas. O chamado “*deep learning*” se tornou hoje metodologia de grande potencial no processamento de imagens, análise e elaboração de resultados relacionados a produção no campo. Desde detecção de plantas espontâneas a recomendações de correção do solo, a IA traz hoje a possibilidade de otimização de várias etapas do ciclo produtivo, o que torna sua utilização essencial no cultivo moderno. As metodologias empregadas no aprendizado de máquinas, tendenciam futuras tomadas de decisões a se tornarem mais assertivas, visto que considera inúmeros fatores e variáveis, como condições climáticas, propriedades do solo, disponibilidade hídrica e, até mesmo, controle financeiro (FOUNTAS et al., 2020).

2.3.3 Satélites de Dupla-Utilidade

Uma grande tendência no mercado espacial para os próximos anos é a capacidade de multi-utilidade dos satélites. Os dados de sensores orbitais são potencializados quando analisados na presença de conjuntos de dados auxiliares. Missões como a NovaSAR, por

exemplo, contarão com cargas complementares, AIS e *S-band* SAR, colocadas no mesmo dispositivo para ampliar a produtividade do satélite e o valor comercial. Outros exemplos abrangem a constelação de comunicação IRIDIUM, em que as plataformas foram projetadas para ter capacidade para uma carga secundária. O espaço ainda continua um ambiente de oportunidades em um mercado ainda restrito, porém com a tendência de expansão e investimentos cada vez maiores nesse nicho de atuação, especialmente na órbita geoestacionária e satélites de baixa órbita, empresas como a UrtheCast (<https://earthdaily.com/>), tendem a investir cada vez mais em grandes ativos espaciais (JARMAN et al., 2018).

2.3.4 Satélites com Atuação em Tempo Real

Uma maior demanda em aplicações visando a obtenção de dados quase em tempo real, especialmente dos mercados comercial e militar, pressionou o mercado espacial pelo desenvolvimento de satélites de dados geoestacionários, como o *European Data Relay Satellite System* (EDRS) da ESA (<https://artes.esa.int/european-data-relay-satellite-system-edrs-overview>), sendo o primeiro, lançado em 2016 (CALZOLAIO, 2020).

Esses satélites permitirão que sensores de observação em baixa órbita tenha comunicação contínua com estações de controle terrestre, fato este que facilitará a transferência de dados em tempo real de satélites para terra.

2.3.5 Processamento a bordo

Os satélites hoje produzem um grande volume de dados e informações. O satélite Sentinel 1, por exemplo, produz aproximadamente 1,6 TB/dia de dados, os quais são enviados para uma estação terrestre, e posteriormente processados. Este número se torna ainda mais expressivo quando analisadas situações, em que o usuário final utiliza apenas uma fração desses dados para extração das informações desejadas. Este fato, tem motivado o desenvolvimento de alterações na estrutura computacional a bordo de satélites. Uma grande expectativa tem sido gerada com a possibilidade de mudanças relacionadas a extração de informações irrelevantes ou de baixo potencial de uso, onde o objetivo principal seria vincular a inteligência aos próprios sensores orbitais, realizando o processamento de filtragem dos dados no próprio satélite, fato que reduziria a troca de dados e, conseqüentemente, expandiria a capacidade de resposta do

sistema (JARMAN et al., 2018).

Um exemplo dessa aplicação é a missão PhiSat-1. O lançamento da missão da Agência Espacial Europeia (ESA) aconteceu no dia 3 de setembro de 2020, levando este satélite, que, na verdade, é um CubeSat (nanossatélites em forma de cubo com peso inferior a 1,33 quilogramas) (ESPOSITO et al., 2019). O PhiSat fica a aproximadamente 530 km de altitude e voa a mais de 27.500 km/h, em órbita sincronizada com o Sol. O objetivo da missão é estudar a Terra, coletando um grande volume de imagens do nosso planeta tanto nas bandas do visível, quanto na banda de absorção no infravermelho, o qual, através do uso da IA, identifica e descarta as imagens que aparecem com alta incidência de nuvens, o que resulta numa economia de cerca de 30% da largura de banda, o que otimiza o processo como um todo. Esta tecnologia foi construída e testada pela Ubotica, uma startup irlandesa, em colaboração com a Cosine, fabricante da câmera que tem a IA da Intel a bordo (GIUFFRIDA et al., 2020).

2.4 Considerações Finais

A busca incessante por respostas em questões como “produzir mais, utilizando a menor quantidade de água” faz com que o ambiente tecnocientífico busque alternativas em um curto espaço de tempo, para que a produção de alimentos atenda a uma fração cada vez maior da população, com uma dependência cada vez menor dos recursos finitos disponíveis no planeta.

Para que isso ocorra, os satélites são utilizados como metodologia de suporte na gestão agrícola baseada na variabilidade espacial dos elementos que exercem influência na produtividade das lavouras, e trazem hoje maior capacidade e facilidade na elaboração de análises especializadas para o subsídio em tomadas de decisão no manejo agrícola. Dentro disso, a atuação de profissionais especializados na aplicação das informações geoespaciais como ferramenta de manejo na agricultura torna-se peça essencial para difusão de novas práticas no modelo de gestão agrícola e otimização dos sistemas produtivos, fato este que eleva as perspectivas de demanda por profissionais da área.

3 MISSÕES SATELITAIS

3.1 GRACE

A missão GRACE foi composta por dois satélites gêmeos produzidos através de uma parceria estruturada entre a NASA e o *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (DLR), da Alemanha. O lançamento dos satélites ocorreu em março de 2002, com o objetivo de estudar as variações temporais do campo gravitacional da Terra, originadas através da distribuição de massas entre a criosfera, hidrosfera e atmosfera. A missão tinha originalmente a proposta de duração estimada em cinco anos, no entanto a missão permaneceu ativa até 17 de outubro de 2017 (TAPLEY et al., 2004).

A metodologia de funcionamento baseada no uso de dois satélites representou um avanço em relação às demais missões, visto que os dados do GRACE são obtidos a partir das variações de velocidade e de distância entre os dois satélites, variações estas que ocorrem de forma apurada, em decorrência do aspecto físico da superfície terrestre, mantendo a precisão dos dados na casa do nanômetro (CASTRO JÚNIOR, 2018).

O modelo de mensuração do GRACE é fundamentado no princípio gravimétrico, em que a soma da massa das águas superficiais e subterrâneas exerce influência sob o campo gravitacional da Terra, a qual permite que essas variações sazonais no campo gravimétrico sejam empregadas como um parâmetro indicativo de mudanças no total armazenado (TWS) em uma análise vertical (AGHAKOUCHAK et al., 2015). Tais variações também podem ser percebidas por receptores que compõem o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) GNSS, como pode ser visto em Montecino et al, 2016, em que é abordada a correlação entre dados obtidos da missão GRACE e as variações altimétricas a partir de medições com receptores GNSS.

As observações obtidas por meio da missão GRACE, proporcionaram uma maior compreensão do ciclo hidrológico e de parte de suas variáveis. No entanto, a utilização dos satélites GRACE ainda possui limitações em aplicações que requerem resolução temporal e espacial mais detalhadas. Dentro disso, a assimilação de dados do GRACE, correlacionada a modelos numéricos de superfície surge como solução direta na otimização das resoluções espaço-temporais da missão, o que aumenta a capacidade de utilização dos produtos da missão (HOUBORG et al., 2012).

3.2 TRMM

De modo geral, eventos de estiagens prolongadas possuem influência direta do déficit hídrico causado pela falta de chuvas por um período extenso. Distinguir e monitorar estas anomalias pluviométricas é de grande valia para estudos e pesquisas direcionadas a ocorrência de secas. Dessa forma, a base de produtos obtidos a partir da missão TRMM surge como ferramenta potencial, sobretudo quando a área de interesse possui grande extensão territorial e lacunas de dados pluviométricos (ANDERSON et al., 2016).

A missão TRMM foi lançada em 1997 em um programa conjunto entre a NASA e JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), a qual contou com inúmeros sensores remotos ativos e passivos, que permitiram a realização de estimativas realistas de precipitação (HUFFMAN et al., 2007). Foi planejada com o objetivo de investigar a distribuição espaço-temporal da precipitação como variável de influência no ciclo hidrológico. A missão encerrou o processamento de dados no ano de 2019 (LEVIZZANI et al., 2020). Informações sobre a missão TRMM estão disponíveis em: <https://gpm.nasa.gov/missions/trmm>.

Possui grande dinamismo quanto a geração de produtos, a depender dos instrumentos associados nos algoritmos de estimativa. Neste estudo, foi utilizado o produto 3B43 v7, produto este caracterizado por ser a versão mensal do conjunto de dados 3B42 (GEBREMICHAEL et al., 2010).

Embora exista facilidade e praticidade na obtenção dos dados e produtos da missão TRMM, é de grande valia conhecer os fatores limitantes. Estudos como o de Tian e Peters-Lidard (2010) demonstram que a missão apresenta erros significativos em regiões de relevo mais complexo, assim como tende a apresentar incertezas mais acentuadas no monitoramento de chuvas menos intensas (TANG et al., 2016).

3.3 FLDAS

O FLDAS (MCNALLY et al., 2017) é uma instância personalizada do *Land Information System* (LIS) da NASA (<http://lis.gsfc.nasa.gov/>) que foi adaptado para funcionar com domínios, fluxos de dados, monitoramento e previsão associados à avaliação da segurança alimentar em cenários de países em desenvolvimento com baixa disponibilidade de dados. A adoção do LIS permite que a *Famine Early Warning Systems Network* (FEWS NET) aproveite os modelos de superfície da terra existentes e gere conjuntos de umidade do solo, evapotranspiração e outras variáveis com base em vários dados meteorológicos ou modelos de

superfície terrestre. O objetivo do projeto FLDAS é conseguir um uso mais eficiente das observações hidro-climáticas disponíveis e foi projetado para ser adotado regularmente no apoio às decisões da FEWS NET. Foi criado no âmbito de um Programa de Ciências Aplicadas da NASA com a colaboração da *U.S. Geological Survey (USGS)*, *Earth Resources Observation and Science (EROS)*, *NASA Goddard Space Flight Center (GSFC)* e *University of California Santa Barbara (UCSB)* através do grupo *Climate Hazards Group (CHG)* (MCNALLY et al. 2017).

3.4 GLDAS

Com o objetivo de representar fluxos e comportamento de variáveis, o modelo de reanálise *Global Land Data Assimilation System (GLDAS)* tem gerado dados hidrológicos terrestres com controle de qualidade, espacialmente e temporalmente consistentes, incluindo ET e outras variáveis que afetam a evaporação e a transpiração, como temperatura, precipitação, umidade, vento, umidade do solo, fluxo de calor e radiação solar (RODELL et al., 2004).

O GLDAS é um produto global que possibilita a análise comparativa de variáveis climáticas e hídricas de diferentes lugares do planeta, usando majoritariamente observações derivadas de sensores remotos e avaliações *in-situ* através da assimilação de dados terrestres obtidos por meio de uma rede de estações climáticas. O GLDAS foi desenvolvido pela *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*, *Goddard Space Flight Center (GSFC)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* e *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)* (NASA, 2017).

O desenvolvimento desse produto aumentou a capacidade de predição climática na superfície terrestre. Possui importante papel no armazenamento de informações, atuando como banco de dados para pesquisas e aplicações que objetivam a melhor compreensão e avaliação das estruturas espaço-temporais das interações entre solo e atmosfera, e o papel da superfície terrestre na estruturação de variáveis hidro-climáticas. (RODELL et al., 2004).

4 INFRAESTRUTURA DE DADOS E METODOLOGIAS EMPREGADAS

4.1 Contextualização da Área de Estudo

As Regiões Hidrográficas Brasileiras (RHB) foram instituídas pela Divisão Hidrográfica Nacional (DHN) e pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH). São consideradas regiões hidrográficas: bacias, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas limítrofes, com características socioeconômicas e naturais semelhantes. O objetivo principal desta divisão é direcionar o planejamento e gestão racional dos recursos hídricos do país (CNRH, 2003).

Este estudo teve por foco as bacias hidrográficas do Paraná, Paraguai, Tocantins-Araguaia, Amazônica e do São Francisco, regiões hidrográficas que correspondem às áreas de maior potencial produtivo agrícola no país, representando sua importância no cenário hídrico brasileiro.

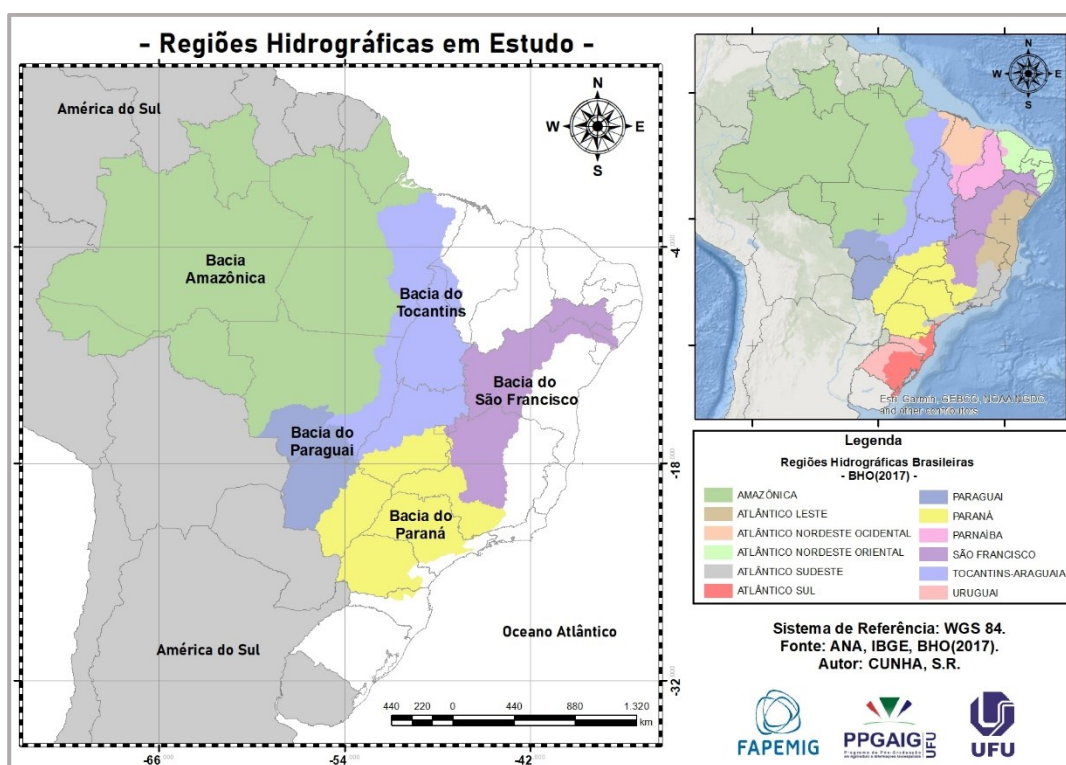


FIGURA 5. Mapa da área de estudo.

A Bacia Amazônica, maior bacia hidrográfica do mundo, com um dos maiores potenciais hídricos do planeta para agricultura, pecuária, abastecimento e geração de energia elétrica, compreende em seu total 8 países da América do Sul (BATISTELLA et al., 2009). No

Brasil, abrange mesmo que em parte, os estados do Amazonas, Acre, Amapá, Pará, Mato Grosso, Rondônia e Roraima.

A Bacia do Paraná está localizada nas regiões centro-sul e sudeste do país. Abrange os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Distrito Federal. Ao todo possui aproximadamente 1,5 milhões de quilômetros quadrados, englobando além do Brasil, o nordeste da Argentina, leste do Paraguai e norte do Uruguai (MILANI et al., 1994). A bacia possui um grande potencial hidrelétrico, além de apresentar elevada atividade agropecuária.

A Tabela 2 apresenta o rendimento de grãos de soja no país, em quilogramas por hectare nos estados compreendidos pela bacia do Rio Paraná. É possível observar que, grande parte dos estados pertencentes a bacia do Paraná, apresenta uma produtividade média(kg/ha) superior à média nacional de 3.969 kg/ha na safra 20/21, segundo informações da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) que fornece informações oficiais de produtividade do agronegócio brasileiro a cada safra. Estes números apenas reforçam a importância da Região Hidrográfica da Bacia do Paraná no agronegócio brasileiro e na produção alimentícia mundial (CONAB, 2020).

TABELA 2 – Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos. Safra 20/21, 3º Levantamento. Adaptado de CONAB, 2020.

Brasil	Comparativo de área, produtividade e produção de grãos - produtos selecionados (*)			Safra 2019/20 e 2020/21		
	Área (Mil/ha)			Produtividade (Kg/ha)		
	Safra 19/20	Safra 20/21	VAR.%	Safra 19/20	Safra 20/21	VAR.%
DF	164,4	166,2	1,1	5.309	5.231	1,5
GO	6.074,3	6.123,5	0,8	4.535	4.456	1,7
MG	3.492,8	3.680,9	5,4	4.401	4.300	2,3
SP	2.333,5	2.378,3	1,9	3.963	4.108	3,7
MS	5.029,5	5.157,0	2,5	4.085	4.133	1,2
PR	9.806,3	9.863,7	0,6	4.161	4.101	1,4
SC	1.284,3	1.291,2	0,5	5.079	4.997	1,6
RS	9.013,9	9.206,6	2,1	2.921	3.711	27,0
BRASIL	65.921,0	66.987,0	1,6	3.897	3.969	1,9

A Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia expõe um vasto potencial quando se trata de culturas irrigadas, principalmente no cultivo de grãos, arroz e frutíferas. A área total irrigada, seja por inundação ou por outros métodos, corresponde a cerca de 230.197 hectares, aproximadamente. Possui uma área estimada em 918.822 km², abrangendo os estados de Goiás, Tocantins, Pará, Maranhão, Mato Grosso e o Distrito Federal (ANTAQ, 2013).

A bacia compreende cerca de 42% do território da MATOPIBA, região considerada a grande fronteira agrícola nacional da atualidade, responsável por grande parte da produção brasileira de grãos e fibras (EMBRAPA, 2015; ANA, 2016a).

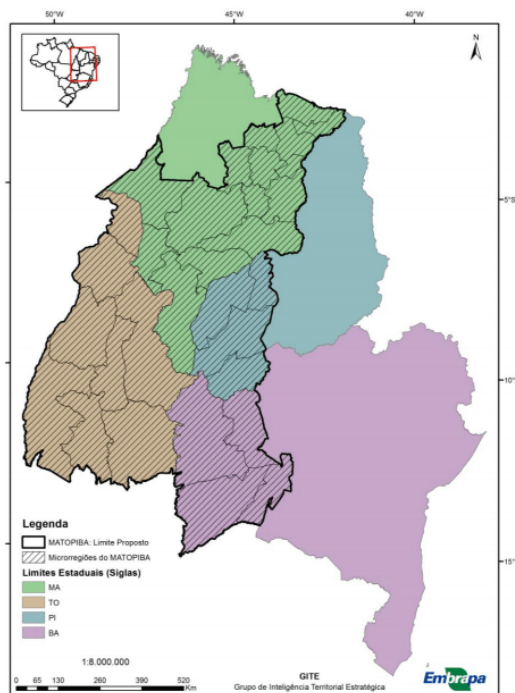


FIGURA 6. Região da MATOPIBA, inicialmente conhecida por MAPITO. Segundo o IBGE, a região possui cerca 324.326 estabelecimentos agrícolas, ocupando uma área de 73.173.485 hectares. Fonte: Miranda, 2014.

Essencial nas esferas econômica, social e cultural da região, a Região Hidrográfica do São Francisco surge como um dos pilares da agricultura no nordeste brasileiro. Ocupa uma área de aproximadamente 640 mil km², abrangendo os estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Distrito Federal.

Atualmente a bacia possui grande aproveitamento na produção energética através de centrais hidrelétricas, na agricultura, navegação e suprimento hídrico à população.

A Região Hidrográfica do Paraguai, representada em 51,8% do seu território no estado do Mato Grosso do Sul e 48,2% no Mato Grosso, possui uma extensão de aproximadamente 363.445 km², o que equivale a 4,6% do território nacional. Em comparação com as demais bacias analisadas neste trabalho, é a menor em área (ANA, 2018). Porém, algumas características particulares como o potencial agrícola, capacidade de geração de energia, navegação pesca e turismo, colocam a Região Hidrográfica do Paraguai entre as mais importantes do Brasil. Com um grande potencial na navegação, possui uma das principais hidrovias da América do Sul, chamada de Hidrovia do Paraguai, que se estende desde Cáceres

no Mato Grosso até Nova Palmira no Uruguai. Ela é responsável pelo escoamento da produção de grãos do Centro-Oeste do Brasil para os países da Bacia do Prata (MEZADRE et al., 2014).

4.2 Análise das Bacias em Estudo no Contexto Hidrogeológico

A hidrogeologia é o segmento das Geociências que investiga o comportamento das águas subterrâneas em relação ao seu volume, direção, movimento, distribuição e sua qualidade. Entender o comportamento rochoso, assim como as características do solo e do ambiente são de suma importância para compreensão do ciclo hídrico, o que consequentemente possibilita a eficiência no uso e uma gestão cada vez mais racional desses recursos hídricos (CPRM, 2008).

A Figura 7 apresenta a classificação dos sistemas aquíferos localizados nas RHB desse estudo quanto à porosidade, fator que influencia diretamente na capacidade de infiltração e armazenamento destes aquíferos.

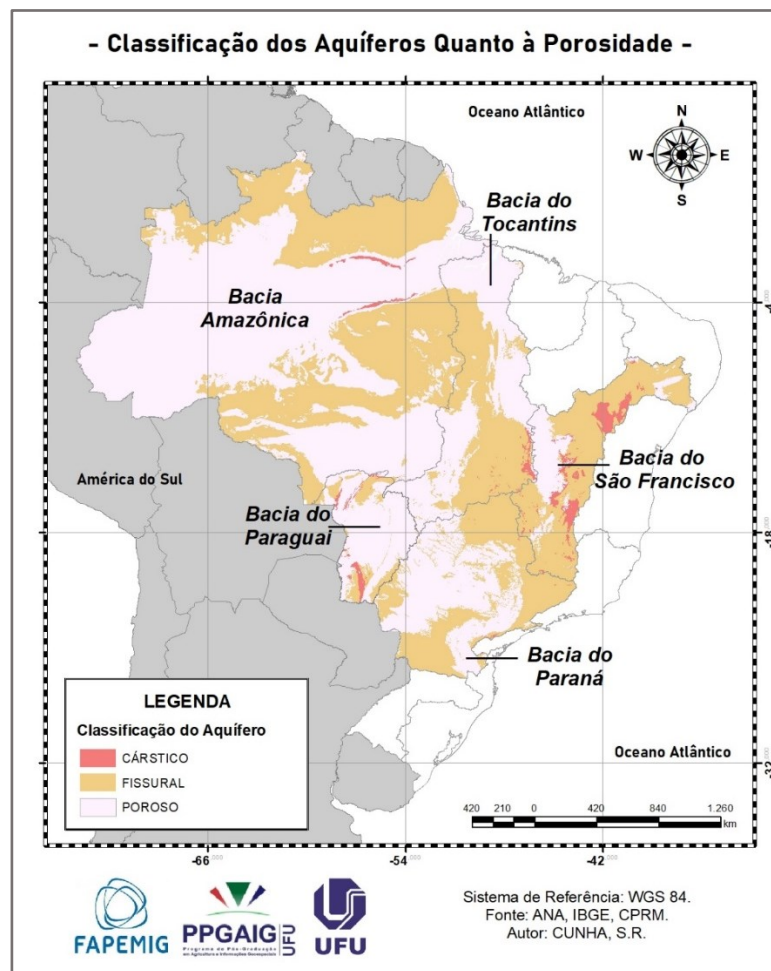


FIGURA 7. Classificação dos sistemas aquíferos pertencentes às Regiões Hidrográficas em estudo quanto à porosidade.

A Tabela 3 traz os principais sistemas aquíferos pertencentes ao território brasileiro, com destaque aos que pertencem às regiões hidrográficas em estudo, apresentando informações quanto à área de recarga, espessura média, precipitação média anual e volumetria.

TABELA 3. Disponibilidade de águas subterrâneas nos principais sistemas aquíferos. Fonte: Adaptado de ANA, 2009.

Sistema Aquífero	Região Hidrográfica dominante	Área de Recarga (Km ²)	Espessura Média (m)	Precipitação (mm/ano)	Reserva (m ³ /s)	
					Renovável	Explotável
Solimões	Amazônica	457.664	-	2.206	4.481,50	896,3
Alter do Chão		312.574	-	2.098	1.247,50	249,5
Boa Vista		14.888	-	2.450	162	32,4
Parecis		88.157	150	1.890	2.324,00	464,8
Jandaíra	Atl.NE Oriental	11.589	600	823	30,50	6,1
Açu		3.674	200	881	10,50	2,1
Itapecuru	Tocantins-Araguaia Paraguai	204.979	100	1.836	1.074,00	214,8
Corda		35.266	160	1.371	46,00	9,2
Motuca		10.717	-	1.470	15,00	3
Poti-Piauí		117.012	400	1.342	650,00	130
Cabeças		34.318	300	1.104	36,00	7,2
Serra Grande		30.450	500	943	63,50	12,7
Barreiras	Atl.Leste	176.532	60	1.938	1.085,00	217
	Atl.Sudeste					
	Atl.NE Oriental					
	Atl.NE Ocidental					
	Tocantins-Araguaia					
Beberibe	Atl.NE Oriental	318	100	2.073	2	0,4
Marizal	Atl.Leste	18.797	200	514	36	7,2
	São Francisco					
São Sebastião	Atl.Leste	6.783	-	1.358	41	8,2
Inajá	São Francisco	956	300	722	1,50	0,3
Tacaratu	São Francisco	3.890	200	965	14,50	2,9
Exu	Atl.NE Oriental	6.397	-	777	3,00	0,6
Missão Velha	Atl.NE Oriental	1.324	130	1.115	1,00	0,2
Urucuia - Areado	São Francisco Paraguai	144.086	300	1.294	1.182,00	236,4
Bambuí	Tocantins-Araguaia	181.868		1.165	201,50	40,3
Bauru-Caiuá	Paraná	353.420	200	1.457	2.939,50	587,9
Serra Geral	Paraná/Atl.Sul	411.855	150	1.681	3.731,50	746,3
Guarani	Uruguai/Paraguai	89.936	250	1.487	805,70	161,1
Ponta Grossa	Tocantins-Araguaia Paraguai	24.807	300	1.543	145,50	29,1
Furnas	Paraná	24.894	200	1.511	143,00	28,6
Total		2.761.086			20.473,20	4.094,60

4.2.1 Bacia Amazônica

A Bacia Hidrográfica Amazônica está situada sobre as bacias sedimentares e o escudo cristalino que constituem a Província Estrutural Amazônica, definida inicialmente por Almeida *et al.*, 1977.

No contexto hidrogeológico, destacam-se as Bacias Sedimentares do Acre, Solimões, Amazonas e Marajós, de idades cretácicas a cenozoicas, as quais hospedam o Sistema Aquífero Grande Amazônia (SAGA) (ABREU; CAVALCANTE; MATTA, 2013).

Atualmente, ainda não se tem muitas informações sobre a distribuição, reservas e contribuições das águas subterrâneas no âmbito amazônico. Porém estima-se que o SAGA, possui reservas hídricas estimadas em 162.520 km³ (ABREU; CAVALCANTE; MATTA, 2013).

4.2.2 Bacia do Paraná

A Bacia Hidrográfica do Paraná tem como principais afluentes o Rio Paranaíba e o Rio Grande, situados nas divisas dos estados de Minas Gerais e Goiás, e Minas Gerais e São Paulo respectivamente. Esses rios estão sobre rochas cristalinas da Província Tocantins e metassedimentos de domínio do Cráton São Francisco. Com isso grande parte do fluxo base advém das águas subterrâneas de aquíferos fissurais (ANA, 2018).

A média e baixa porção da Bacia Hidrográfica do Paraná está sob o contexto da Bacia Sedimentar do Paraná. Essa porção recebe influência de recarga advindas dos aquíferos Serra Geral e Guarani principalmente.

O Aquífero Guarani tem porosidade primária intergranular, de comportamento confinado em 90% de sua extensão e é constituído por arenitos eólicos e fluviais bem selecionados das formações Botucatu e Pirambóia, respectivamente, tendo espessura média de 300 metros. A recarga desse aquífero está restrita a conexão hidráulica entre os basaltos fraturados no interior da bacia, cujo fluxo é para oeste, e pela sua área aflorante na porção da depressão periférica no estado de São Paulo. Contudo, nessa porção a maior parte do escoamento subterrâneo é direcionada para os rios como forma de recarga (CAMPOS, 2004).

O Aquífero Serra Geral é composto por rochas basálticas e está situado estratigraficamente acima da Fm. Botucatu. Esse aquífero é do tipo fissural, podendo chegar a produzir vazões de 10 a 100 m³/h. O seu comportamento é de aquífero livre, visto que sua

recarga se dá através da infiltração da água meteórica pelo seu manto de intemperismo (CAMPOS, 2004).

4.2.3 *Bacia do Paraguai*

A Bacia Hidrográfica do Paraguai é constituída principalmente por rios intermitentes, por isso as águas subterrâneas têm grande influência para manter a recarga e o fluxo base desses rios (MOTTA; GONÇALVES, 2016).

Os principais aquíferos presentes na bacia hidrográfica em questão, estão situados no contexto geológico da Bacia Sedimentar do Paraguai, cujo sistema de armazenamento é dado por porosidade primária intergranular. Dentre os principais aquíferos têm-se, o sistema aquífero Guarani, Pantanal e Água Doce e Serra Geral (MOTTA; GONÇALVES, 2016). Tais sistemas são representados por rochas areníticas, clásticas com intercalações de arenitos finos a grossos e de siltitos e folhelhos, e por arenitos conglomeráticos com intercalações de folhelhos e dolomitos respectivamente (VASCONCELOS et al., 2012).

Dentre os três sistemas aquíferos apresentados, o sistema aquífero Guarani possui comportamento livre e confinado, e é considerado um dos maiores potenciais hídricos da Bacia Sedimentar do Paraguai. (MOTTA; GONÇALVES, 2016).

4.2.4 *Bacia Hidrográfica do São Francisco*

A Bacia Hidrográfica do São Francisco tem como principal fonte de recarga em épocas de estiagem o Sistema Aquífero Urucuia (SAU). O SAU está situado na margem esquerda da porção média da Bacia Hidrográfica em questão (CHANG; SILVA, 2015).

O SAU é um aquífero granular, constituído por camadas de arenitos fluviais e eólicos do Grupo Urucuia, podendo atingir espessuras de 350 m. A característica granular desse aquífero garante um maior armazenamento de água e é responsável por manter o fluxo base do Rio São Francisco e seus afluentes na época de seca. Segundo a ANA (2013), as reservas reguladora e permanente desse aquífero são de 22,37 km³/ano e 1329 km³, respectivamente. Portanto, o SAU compreende cerca de 41% da água subterrânea da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco e é responsável por aproximadamente 30% da vazão média do Rio São Francisco (ANA, 2013; CBHSF, 2016).

4.2.5 Bacia do Tocantins-Araguaia

Os principais aquíferos existentes no âmbito da Bacia hidrográfica do Tocantins - Araguaia compreendem quatro diferentes arcabouços geológicos que se comportam de maneiras distintas em relação ao armazenamento de águas subterrâneas, sendo eles: Cráton Amazônico, Província Tocantins, Bacia Sedimentar do Paraná, Bacia Sedimentar do Paraguai e Bacia Sedimentar do Urucua. Na região das bacias hidrográficas em questão, diferenciam dois sistemas aquíferos principais, o cristalino e o sedimentar (MATTA, 2000; ANA, 2018).

O aquífero cristalino tem como mecanismo de armazenamento principal as fraturas e as falhas. Os principais aquíferos relacionados a esse sistema são representados pela Fm. Serra Geral da Bacia do Paraná e pelas rochas do embasamento cristalino da Província Tocantins que ocorrem nos estados de Goiás e Tocantins, e do Cráton Amazônico no Pará (CPRM, 2008).

O aquífero sedimentar tem maior capacidade de armazenamento devido a sua porosidade intergranular. Os principais aquíferos relacionados a esse sistema, são representados pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná em Goiás e Mato Grosso, da Bacia do Paraguai e Urucua em Tocantins (CPRM, 2008).

4.3 Informações da Disponibilidade Hídrica Divulgadas pela ANA

A partir da resolução nº58, de janeiro de 2006, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, conferiu à Ana a incumbência de elaborar periodicamente o chamado “Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil”, documento este que visa a exposição da situação dos recursos hídricos, bem como o contexto de sua gestão no país. Dentro disso, este relatório se estabeleceu como uma importante ferramenta para acompanhamento sistêmico e periódico da condição em que se encontravam os recursos hídricos em escala nacional, sendo sua elaboração pautada em informações provenientes da ANA, através de órgãos estaduais de gestão hídrica e ambiental, juntamente a agentes federais que dispõem de informações de temáticas abordadas neste relatório, como por exemplo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (ANA, 2010).

O primeiro Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil foi lançado no ano de 2009. Ele apresentou o cenário dos recursos hídricos no país, fundamentado a partir de informações e elementos apurados até o mês dezembro de 2007. Posteriormente, foram lançados os informes, que visavam atualizar as informações do Relatório de Conjuntura no espaço de tempo entre suas edições, com periodicidade anual. Os informes, caracterizados por

serem mais compactos, apresentaram as alterações verificadas no contexto hídrico nacional relativos ao ano precedente, além de abordar ocorrências de eventos hidrológicos mais intensos, condições das águas superficiais e acontecimentos relevantes no uso e gestão dos recursos hídricos. Complementarmente, os informes anuais possuíam a incumbência de fundamentar a produção do Relatório de Conjuntura, que possui previsão de lançamento quadrienal (ANA, 2010).

4.3.1 Relatório de Conjuntura de 2009

No Brasil, a precipitação média anual histórica (1961 a 2007) é de 1.761 mm, apresentando valores acima de 3.000 mm para a região Amazônica e valores de precipitação anual média na casa dos 500 mm na região do Semiárido Nordestino.

O desvio percentual do ano hidrológico analisado neste relatório em relação ao desvio percentual dos valores históricos (1961 a 2007) apresentou queda para as Regiões Hidrográficas Amazônica e do Tocantins Araguaia, com desvios percentuais na faixa de -15% e -14% respectivamente. As Regiões Hidrográficas do Paraguai, Paraná e São Francisco, apresentaram desvio percentual de 1%, 2% e 10% acima da média histórica (ANA, 2009).

Entre abril e setembro de 2007, foi registrado um dos semestres mais secos da região, em toda a série de dados registrados, o qual apresentou comportamento severamente seco e extremamente seco, nas cabeceiras do Rio Paranaíba, pertencente à Região Hidrográfica do Paraná, e na Região Hidrográfica Tocantins-Araguaia, além de compreender uma extensa área da Região Hidrográfica do São Francisco.

Neste primeiro relatório disponibilizado pela ANA, no ano de 2009, foi feito o registro acerca de eventualidades hídricas críticas, sobretudo entre o período de outubro de 2006 a setembro de 2007, em que cerca de 788 municípios decretaram estado emergencial em decorrência da seca severa. Grande parte destes municípios se localizavam na região do semiárido nordestino, os quais abrangem as Regiões Hidrográficas do São Francisco, Paraguai, Tocantins-Araguaia, Atlântico Nordeste Oriental e Atlântico Leste.

4.3.2 Informe de 2010

No segundo relatório disponibilizado pela ANA, no ano de 2010, foi feito o registro acerca do período hidrológico de outubro de 2008 a setembro de 2009. Em relação ao primeiro relatório, este informe apresentou novamente a estiagem registrada na região do semiárido

nordestino, porém com intensidade mais branda. Foram registrados eventos de chuva acima da média histórica na região norte, os quais acarretaram em cheias de grande magnitude na bacia Amazônica (ANA, 2010).

4.3.3 Informe de 2011

Neste informe, foi feito o registro acerca do período hidrológico de outubro de 2009 a setembro de 2010. Para este período, foram registrados eventos de chuva acima da média histórica nas regiões Sul, Sudeste e em parte dos estados do Alagoas e Pernambuco, os quais ocasionaram cheias de grande magnitude nessas regiões. Contudo, foi registrado um volume de chuvas abaixo do padrão na bacia Amazônica, o que ocasionou vazões abaixo da média histórica regional para o Rio Amazonas e seus afluentes (ANA, 2011).

4.3.4 Informe de 2012

O informe de 2012 apresentou o registro do período hidrológico de outubro de 2010 a setembro de 2011. Para o período analisado, essas anomalias se mostraram recorrentes em determinadas regiões do país. Em comparação com o informe do ano de 2011, o período hidrológico apresentado neste informe apresentou volume de chuvas acima da média histórica, o que contribui para um aumento de aproximadamente 9,3% no volume de água armazenada nos reservatórios do nordeste brasileiro. O ano de 2011, foi caracterizado por uma das tragédias climáticas de maiores proporções até então registradas no país, ocorrida na região serrana do estado do Rio de Janeiro, diretamente ligada ao aumento significativo no volume de chuvas. Cheias de grande magnitude, ocasionadas pelo volume de chuvas acima da média histórica também foram registradas em São Paulo, no mês de janeiro; Alagoas e Pernambuco, no mês de maio; em Santa Catarina, entre os meses de julho e setembro e em Minas Gerais no mês de dezembro. Regiões do Sul do Brasil, principalmente no Rio Grande do Sul, constataram volume de chuvas abaixo da média histórica, levando vários municípios a situação de calamidade pública em decorrência da seca (ANA, 2012).

4.3.5 Relatório de Conjuntura de 2013

O Relatório de Conjuntura, publicado em 2013, apresentou um balanço do período hidrológico dos últimos 4 anos. Em um contexto geral, o ano de 2012 apresentou queda no

volume de precipitação em relação à média dos anos anteriores, para todas as regiões do país. As bacias hidrográficas do Amazonas, Paraná, Paraguai, Uruguai e Atlântico Sudeste mantiveram em 2012 valores aproximados da média histórica de precipitação anual, porém abaixo das médias nos anos anteriores.

A região nordeste apresentou o cenário de maior queda na disponibilidade hídrica no ano de 2012. O baixo volume e a irregularidade do regime das precipitações na região, principalmente no que abrange o semiárido brasileiro, juntamente com o contexto hidrogeológico, impactaram de forma direta na disponibilidade hídrica local. A região se caracterizou por baixos índices pluviométricos, elevadas temperaturas durante todo o ano, baixa amplitude térmica, forte impacto da insolação, além de apresentar altas taxas de evapotranspiração, chegando a superar o total pluviométrico, cenário que caracteriza a ocorrência de índices negativos no balanço hídrico. Fatores como a ausência de sistemas aquíferos sedimentares, que evidenciam um potencial fonte de segurança hídrica para o abastecimento e a ausência de rios com alto porte hídrico, também impactaram diretamente no cenário de baixa disponibilidade hídrica no semiárido brasileiro (ANA, 2013).

4.3.6 Informe de 2014

O informe de 2014 apresentou o registro do período hidrológico de outubro de 2012 a setembro de 2013. Os desastres naturais provocados pelos eventos climáticos extremos resultaram em inúmeras mortes e prejuízos materiais.

A rigorosa seca que atingiu o nordeste brasileiro no ano de 2012, apresentou-se de forma ainda mais intensa, resultando em um ano de 2013 ainda mais seco na região, com baixa disponibilidade hídrica e chuvas abaixo da média histórica. De acordo com informações apresentadas pela Organização Meteorológica Mundial (WMO), o nordeste brasileiro viveu a seca mais intensa das últimas 5 décadas, condição que prejudicou diretamente na produção agropecuária e no abastecimento hídrico nas regiões urbanas. Mais de 95% dos municípios na região do semiárido nordestino declararam estado de calamidade pública. No entanto, em algumas regiões brasileiras, foram registrados eventos críticos de chuvas acima da média histórica, o que acarretaram em desastres naturais, e impactos diretos, tanto socialmente quanto economicamente (ANA, 2014).

4.3.7 Informe de 2015

O informe de 2015 apresentou o registro do período hidrológico de outubro de 2013 a setembro de 2014. O ano hidrológico foi caracterizado por intensa estiagem nas regiões sudeste, norte e centro do país. Nestas regiões, o ano foi considerado como extremamente seco, devido ao baixo volume de precipitações. Este fato, causou impactos diretos no regime fluviométrico, o qual provocou vazões inferiores a 50% da média histórica em quase todas as regiões hidrográficas do país, as quais impossibilitaram a recuperação dos níveis dos reservatórios, e consequentemente motivaram 1.414 municípios a decretarem situação de emergência no país. No entanto, os eventos críticos não se limitaram a ausência de chuvas. Em algumas regiões no norte do país, foram registradas um volume de chuvas acima da média histórica, provocando desastres naturais e consequente prejuízo econômico, como foi o caso da inundação da BR-364, a qual ficou aproximadamente 2 meses interditada, isolando dessa forma, o estado do Acre dos demais estados brasileiros, o que provocou intensas complicações no abastecimento hídrico da região (ANA, 2015).

4.3.8 Informe de 2016

A ocorrência de eventos climáticos críticos se intensificou no Brasil desde o início do século XXI. Desde 2012, um aumento significativo na intensidade com que esses eventos tem atingido o país foi observado. A severa estiagem registrada nas regiões brasileiras atingiu, até mesmo, regiões que historicamente apresentam alta disponibilidade hídrica. Na região sudeste, os reservatórios de armazenamento de água apresentaram uma redução extrema no volume armazenado (ANA, 2016).

Embora o ano de 2015 tenha apresentado uma situação mais favorável quanto à disponibilidade hídrica do que o ano anterior, expôs anomalias de precipitações abaixo das séries históricas nas regiões hidrográficas do centro oeste, nordeste e sudeste, além de apresentar alto volume pluviométrico na região sul. O efeito cumulativo da seca apresentada, nos anos anteriores, fez com que o nível do volume armazenada de água na maior parte dos reservatórios brasileiros permanecesse em baixa. A avaliação do estoque hídrico disponível nos reservatórios da região nordeste registrou, em 2015 um decréscimo de 8,27% na capacidade de reserva hídrica, o que atestou os menores volumes de água armazenada nas últimas décadas (ANA, 2016).

4.3.9 Informe de 2017

O informe de 2017 apresentou o registro do período hidrológico de outubro de 2015 a setembro de 2016. O ano de 2016 foi caracterizado por um clima extremamente seco em grande parte do país, apresentando redução geral de 13% no volume de precipitação. Apesar das enchentes ocorridas no Paraná, Centro-Oeste de São Paulo e Mato Grosso do Sul, as secas severas foram predominantes em grande parte do país, com destaque para as regiões do sudeste do Pará, sul do Maranhão, sudeste do Tocantins, sudoeste e sul da Bahia e Distrito Federal. Em decorrência da estiagem dos anos anteriores, cerca de 65 açudes que sustentavam o abastecimento comunitário estavam secos, com um volume correspondente a 11,5% da capacidade total de armazenamento hídrico. O rio São Francisco manteve as vazões abaixo da média histórica, apresentando níveis em queda constante nos reservatórios (ANA, 2017)

4.4 Conjunto de Dados

Foram utilizados nesse trabalho uma base de dados constituída por 4 variáveis, sendo elas o total de água armazenada, com observações obtidas através dos satélites GRACE, a precipitação baseada no satélite TRMM, o escoamento baseado no modelo FLDAS e a evapotranspiração nativa do modelo GLDAS.

Todas as variáveis são componentes fundamentais do balanço hídrico climatológico e correspondem ao incremento e as perdas de água. Os dados utilizados compreendem o período de análise de 2003 a 2016.

4.4.1 Total de Água Armazenada

A variável total de água armazenada (TWS) representa a anomalia total do armazenamento de água terrestre, incluindo umidade do solo, neve, águas superficiais (rios, lagos, reservatórios, etc.), bem como águas subterrâneas e aquíferos (LANDERER et al., 2012).

As variações no campo de gravidade da Terra ocorrem em razão da redistribuição de massa no interior do planeta, na superfície e acima dela (WAHR et al., 1998). Em um corte vertical onde a espessura da lâmina de água pode chegar a proporções de quilômetros, as pequenas variações de massa mensais perto da superfície terrestre são de dimensões centimétricas. A partir disso, os dados obtidos a partir dos satélites GRACE são identificados como “altura equivalente d’água” (*water equivalent thickness*), dimensionadas em unidades

de comprimento (mm, cm) que retratam o total de água armazenada, termo no inglês denominado *Total Water Storage* (TWS) (ROSENHAIM, 2017).

As informações de variação do armazenamento terrestre de água foram obtidas por meio da missão GRACE, utilizando a média mensal da solução disponibilizada pelo JPL, centro tecnológico responsável pelo desenvolvimento e controle dos satélites não tripulados da NASA, com o suporte do programa MEaSURESs.

As observações da missão GRACE são disponibilizadas através da página (<http://grace.jpl.nasa.gov/>). Os dados foram obtidos no formato netCDF-4, executados utilizando o *software* Panoply, que plota interativamente dados georreferenciados e dados codificados nos formatos netCDF, HDF e GRIB.

O arquivo netCDF é uma organização estruturada em n-dimensões onde a distribuição espacial de uma variável ou de um conjunto de variáveis são representadas por meio matricial. O principal objetivo da interface netCDF é possibilitar a criação, o acesso e o compartilhamento de dados de forma a conduzir a matriz de uma forma móvel e auto descritiva (UNIDATA, 2017). A Figura 8 traz a visualização da interface do software Panoply, executando um arquivo de TWS no formato netCDF.

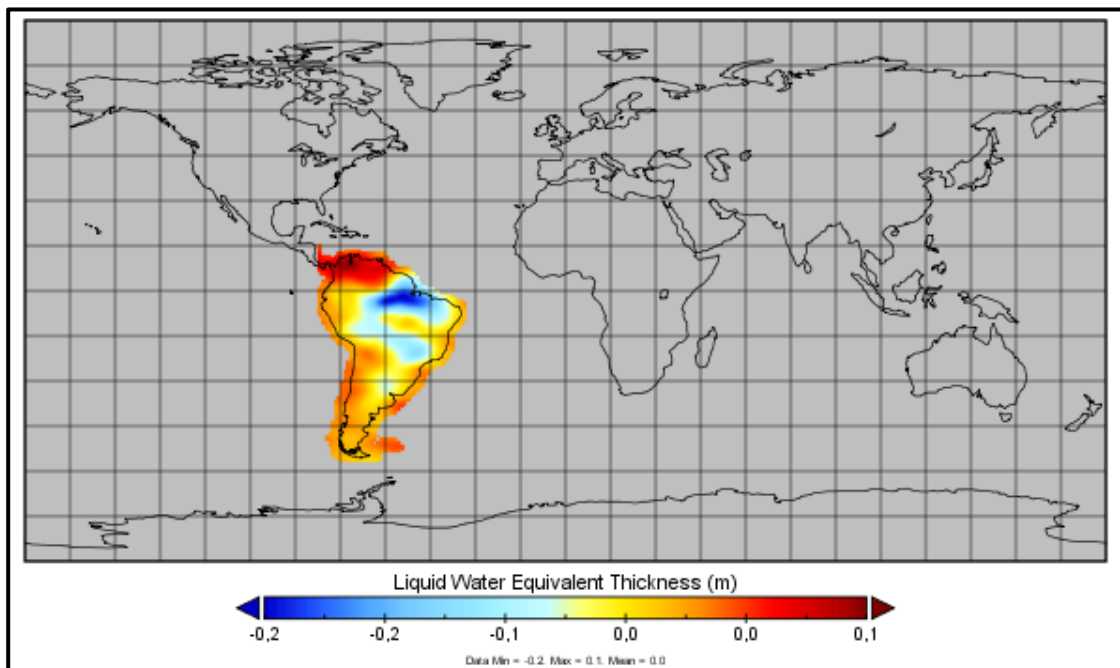


FIGURA 8. Interface do software Panoply. Além de possibilitar a importação e exportação de arquivos, a aplicação possibilita a visualização e manipulação dos dados, o que facilita a análise de arquivos netCDF, HDF e GRIB em pesquisas em níveis regionais e continentais.

Os dados do GRACE apresentaram-se parametrizados com resolução espacial de 1° x 1°, no formato de grade, cujas coordenadas estão vinculadas ao elipsoide de referência WGS 84 (*World Geodetic System 1984*), e possuindo resolução temporal mensal. A versão utilizada foi a RL06 v03 (*Release 6.0 version 03*), nível 3 de processamento. A unidade de medida das observações é métrica.

Com o objetivo de analisar a variação do total de água armazenada, ou TWS, para as RHB em estudo, no período de 2003 a 2016 e calcular a variação mensal, foram utilizados os dados disponibilizados pela missão GRACE, sendo vetados os dados dos anos de 2002 (ano de lançamento da missão) e 2017 (último ano de funcionamento), e os meses que apresentaram ausência de dados durante a série. As lacunas se concentram principalmente nos períodos pós-lançamento da missão (2002-2004) e nos períodos posteriores a 2010, os quais coincidem com a previsão de fim da vida útil dos satélites da missão GRACE, que foi prevista para 5 anos. A Figura 9 apresenta o total de água armazenada para bacias hidrográficas em estudo para o ano de 2010.

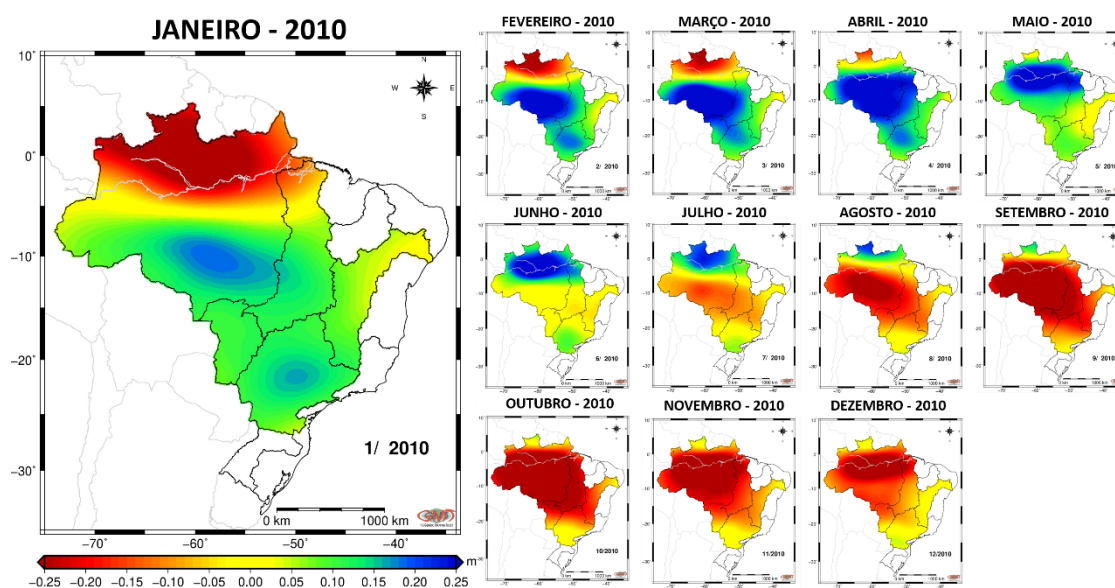


FIGURA 9. Total de Água Armazenada obtida através da missão GRACE para todas as bacias hidrográficas em estudo no ano de 2010.

4.4.2 Precipitação

A precipitação, por definição, é a água proveniente do vapor de água da atmosfera, armazenada na superfície terrestre sob forma chuva, neblina, neve ou geada. No presente trabalho, a variável é baseada na missão TRMM.

Com o objetivo de reduzir as diferenças entre mensurações estimadas por satélite e mensurações em superfície, foi realizada uma validação terrestre (*Ground Validation*) dos

produtos obtidos pelo TRMM. Tais estimativas foram geradas e convertidas em acumulados mensais, processados através de interpolações, nas quais foram gerados os produtos mensais com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (3B31). Posteriormente, utilizando o produto 3B31, foram realizadas as correções das estimativas de precipitação, correções estas realizadas por meio dos sensores infravermelhos do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)*, fornecido com temporalidade de 3h. Desta forma, o produto 3B43 apresentou resolução espacial sob grid regular de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ e resolução temporal de 3 horas, a qual foi disponibilizada também em solução mensal (FENSTERSEIFER, 2013).

As estimativas de precipitação obtidas através da missão TRMM nativos do produto 3B43-V7 foram adequadas como atribuição da Diretoria de Missões Científicas da NASA, utilizando a GES-DISC que possibilita uma visualização interativa online e análise de infraestrutura através da plataforma GIOVANNI, disponível em https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/TRMM_3B43_7/summary. Para este estudo, foram obtidos os valores de precipitação em resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e escala temporal mensal. Os arquivos foram obtidos em formato netCDF, e manipulados utilizando o software *Panoply*. A série temporal dos dados variam de janeiro de 2003 a dezembro de 2016, semelhantemente aos dados da missão GRACE. A Figura 10 apresenta a precipitação mensal para os meses de janeiro e agosto de 2010, respectivamente os meses que correspondem às maiores e menores médias ao longo da série.

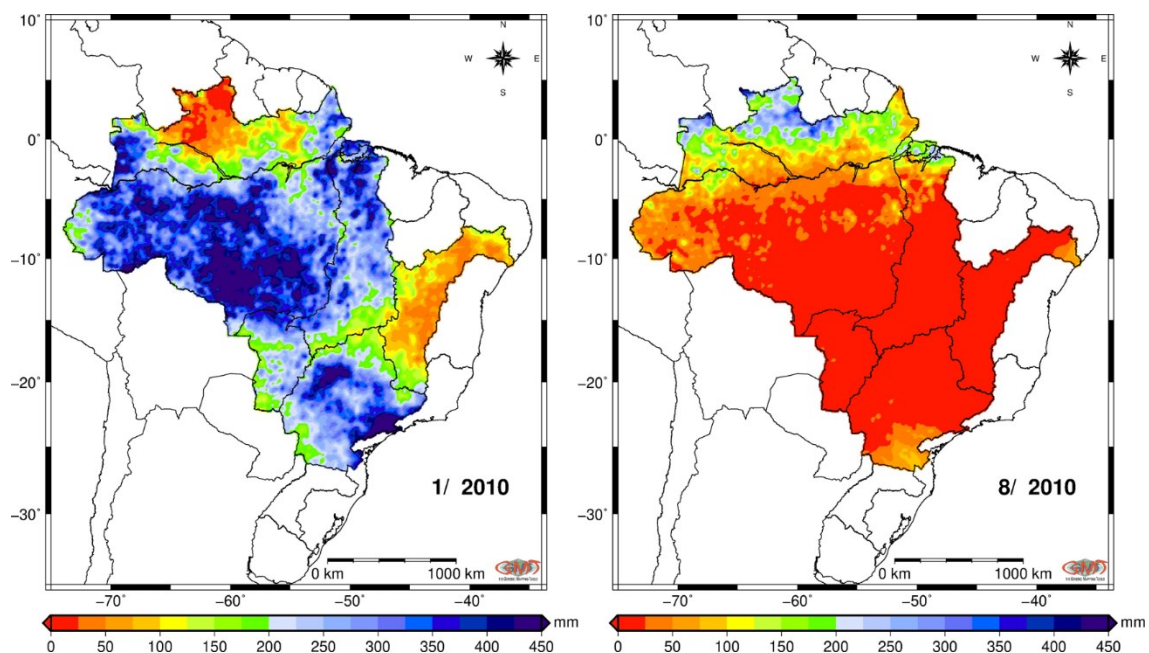


FIGURA 10. Precipitação a partir do modelo TRMM para as bacias hidrográficas em estudo, dos meses de janeiro e agosto de 2010.

4.4.3 Escoamento

A variável escoamento superficial por definição é o estágio onde existe o transporte da água na superfície terrestre. Da precipitação que atinge o solo, uma fração fica retida, na qual uma porção se infiltra e a outra porção esco superficialmente. É possível a ocorrência de um afloramento na superfície da água anteriormente infiltrada, surgindo como fonte para um novo escoamento superficial. Essa variável engloba desde o excedente de uma precipitação intensa e se desloca pela superfície do terreno, até o escoamento de um curso de água, que pode ser suprido tanto pelo excesso de precipitação quanto pelas águas subterrâneas (CARVALHO et al., 2006). A estimativa de dados de escoamento é feita através do modelo FLDAS. A Figura 11 apresenta o escoamento médio para os meses de janeiro e agosto de 2010, para as bacias hidrográficas em estudo.

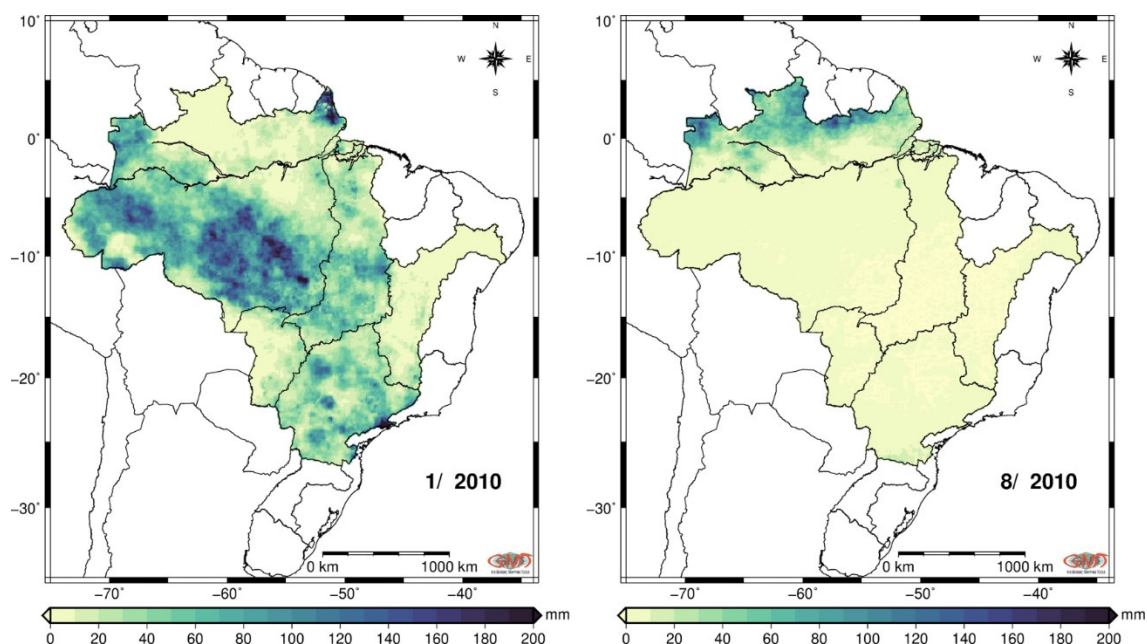


FIGURA 11. Escoamento a partir do modelo FLDAS para as bacias hidrográficas Amazônica, Paraguai, Paraná, São Francisco e Tocantins, para os meses de janeiro e agosto de 2010.

Neste estudo, o conjunto de dados contém parâmetros da superfície terrestre simulados do modelo *Noah Land Surface Model L4*, apresentando resolução espacial de $0,10^\circ \times 0,10^\circ$ e resolução temporal mensal.

Os arquivos foram adquiridos através da plataforma GIOVANNI, disponível em https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/FLDAS_NOAH01_C_GL_M_001/summary, obtidos em formato netCDF, e manipulados primitivamente através da ferramenta *Panoply*. A unidade de

medida nativa dos dados é $\text{kg/m}^2\text{s}$, a qual posteriormente foi convertida para mm/mês para padronização das unidades de medida das variáveis utilizadas.

4.4.4 Evapotranspiração (GLDAS)

A evapotranspiração é uma variável chave do ciclo hidrológico, sendo responsável pela fase de recarga hídrica, que é quando a água retorna para a atmosfera e passa pelo processo de condensação, o qual posteriormente entrará novamente na fase de descarga do ciclo sobre forma de precipitação (HUALAN et al., 2012). Os dados de evapotranspiração utilizados neste trabalho são baseados no modelo GLDAS.

A obtenção de informações sobre a ET de uma determinada região é primordial, visto que sua atuação está diretamente ligada à eficiência de bacias hidrográficas, regime de chuvas e umidade atmosférica, o que faz da evapotranspiração uma das variáveis chave no ciclo hidrológico, como pode ser observado na Figura 12. Adquirir uma estimativa confiável traz a possibilidade de uma maior compreensão do balanço hídrico, o qual fornece fundamentos para uma gestão mais eficiente da irrigação, principalmente em áreas com baixa disponibilidade hídrica. Porém, a aquisição de dados e a obtenção de medidas diretas de ET são processos difíceis e com alto valor financeiro, principalmente em níveis continentais e globais. Desta forma a modelagem surge como uma alternativa viável na estimativa da ET (HUALAN et al., 2012).

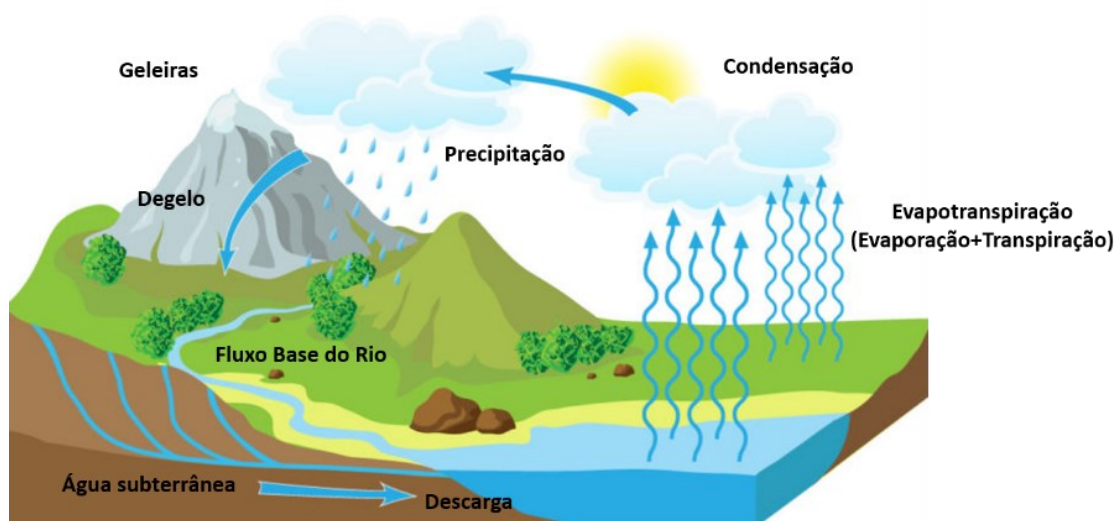


FIGURA 12. Estágios do Ciclo Hidrológico. Fonte: Adaptado de TEIXEIRA, 2019.

As estimativas de evapotranspiração obtidas através do modelo GLDAS contém parâmetros da superfície terrestre simulados do modelo Noah Land Surface Model L4, versão 2.1. Os dados são disponibilizados pelo GES-DISC, através da plataforma GIOVANNI. Para este estudo, foram obtidas as estimativas de evapotranspiração em resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, com solução mensal. Os arquivos foram obtidos em formato netCDF, e manipulados em primeiro momento utilizando o software *Panoply*. A unidade de medida nativa da variável é $\text{kg/m}^2\text{s}$, posteriormente convertida em mm/mês .

No presente trabalho, a evapotranspiração estimada através do GLDAS será utilizada como valor de referência para validação e comparação da evapotranspiração calculada a partir do GRACE.

4.5 METODOLOGIA

O processo metodológico a ser realizado é uma etapa fundamental para a compreensão e planejamento de todo o trabalho. Com o intuito de se ter uma melhor esquematização das etapas, foi elaborado o fluxograma metodológico, apresentado na Figura 13. O trabalho foi segmentado em 4 etapas, sendo estas: ETAPA I – Planejamento; ETAPA II - Aquisição de Dados; ETAPA III - Processamento e Cálculo, ETAPA IV - Análise dos Resultados.

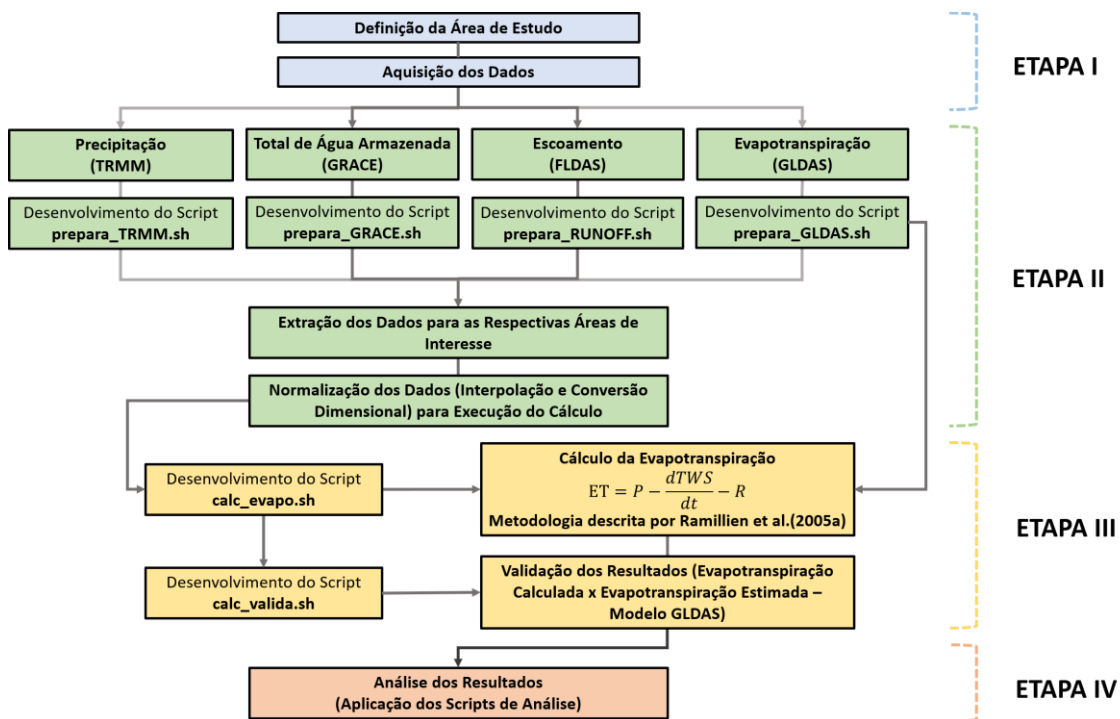


FIGURA 13. Fluxograma metodológico do projeto.

4.5.1 Manipulação dos Dados

A fim de se otimizar as etapas de normalização dos dados, extração, conversão, cálculos e geração dos mapas, foram desenvolvidos *scripts shell* baseados na linguagem computacional AWK, utilizando o ambiente UNIX e o GMT (*Generic Mapping Tools*). Este último se trata de uma coleção de ferramentas de código aberto para manipulação de conjuntos de dados geoespaciais e cartesianos, nos quais incluem filtragem de dados, ajuste de tendência, grade, projeção e interpolações à produção de ilustrações *PostScript* que variam desde gráficos bidimensionais simples a mapas e vistas artificiais em perspectiva 3D. Sua funcionalidade é executada sob o GNU *Lesser General Public License*. (WESSEL et al., 2019).

O primeiro script, renomeado por `prepara_GRACE.sh`, foi elaborado para otimizar a padronização dos arquivos de TWS. Vinculado à arquivos de limitação da bacia, limite do país, e paletas de cores a serem utilizadas na geração dos mapas de TWS, o script prepara os arquivos para o formato padrão utilizado no script de cálculo da evapotranspiração, unifica os arquivos de cada mês em um único arquivo e gera as figuras da altura equivalente d'água específica para cada mês.

O segundo script, renomeado como `prepara_TRMM.sh`, possui objetivos bem próximos do `prepara_GRACE.sh`. O arquivo, que possui sua execução vinculada à arquivos externos de limitação da bacia, do país e um arquivo contendo o padrão de cores a serem usadas nos mapas de precipitação, prepara os arquivos de precipitação mensal para o formato padrão utilizado no cálculo da evapotranspiração. Além disso, gera as figuras de precipitação mensal a partir dos dados originais e interpola os arquivos originais para a resolução de $1^\circ \times 1^\circ$, resolução de referência utilizada no trabalho em virtude da resolução do GRACE.

O script `prepara_RUNOFF.sh`, utilizado na manipulação dos arquivos de escoamento, possui execução equivalente ao dos outros scripts. Além de gerar as figuras de escoamento mensal a partir dos dados originais, o script interpola os arquivos originais de escoamento nativos do modelo FLDAS para a mesma resolução do GRACE ($1^\circ \times 1^\circ$), utilizando o interpolador *spline*.

Após a utilização dos scripts para padronização dos dados, e geração de produtos intermediários, foi desenvolvido o script `calc_evapo.sh`. Este script, é responsável pelo cálculo da evapotranspiração, utilizando os dados de entrada das variáveis TWS, precipitação e escoamento para o ano em estudo, e ano subsequente. A primeira etapa do script é a conversão dos valores de TWS, de metros para milímetros. Posteriormente, é realizado o cálculo da evapotranspiração e a geração das figuras da evapotranspiração resultante para cada mês. É

através deste script também que são gerados os arquivos *txt* da evapotranspiração calculada, arquivo este que foi utilizado posteriormente no processo de validação dos resultados.

Na etapa de validação, foram utilizados um total de 3 scripts. O primeiro, denominado *prepara_coeficiente.sh*, foi desenvolvido com o objetivo de remodelar os arquivos anteriormente gerados, para a posterior execução dos demais scripts de validação, alterando apenas a nomeação dos arquivos de saída do processamento dos cálculos e os arquivos da ET do modelo.

A posteriori, os scripts *coeficiente.sh* e *analise.sh* foram utilizados com o intuito de cálculo da estatística descritiva, correlação e análise do comportamento gráfico dos dados, sendo o primeiro responsável pela obtenção dos valores de média, valores de máximo e mínimo da ET e o valor do Coeficiente de Correlação pelo Método de Pearson, e o segundo pelo cálculo da diferença pontual para os meses de máximo e mínimo por bacia hidrográfica em estudo.

4.5.2 Normalização dos dados

A etapa de padronização dos dados é de fundamental importância para o controle de qualidade da análise dos resultados obtidos. Na Tabela 4, é possível observar que os dados possuem diversificação na resolução espacial e na unidade de medida das variáveis, o que impossibilita o cálculo e aplicação da metodologia. Com isso, faz-se necessário a aplicação de processos de interpolação e conversão para que se normalize os dados, possibilitando assim a aplicação matemática.

TABELA 4. Caracterização das variáveis quanto a unidade dimensional, fonte dos dados, resolução espacial nativa, resolução temporal e órgão responsável pela missão.

Variável	Unidade	Fonte	Resolução Espacial	Resolução Temporal
Precipitação	mm/hr	TRMM	0,25° x 0,25°	Mensal
Total de Água Armazenada	m	GRACE	1° x 1°	Mensal
Escoamento	kg/m ² s	FLDAS	0,10° x 0,10°	Mensal
Evapotranspiração	kg/m ² s	GLDAS-2.1	0,25° x 0,25°	Mensal

Na etapa de processamento dos dados foi feita a reclassificação do grid para padronização das resoluções espaciais das variáveis, visto que a variável TWS possui resolução

de 1° x 1°, a precipitação e evapotranspiração do modelo GLDAS resolução espacial de 0,25° x 0,25° e o escoamento uma resolução de 0,10° x 0,10°. Esta reclassificação se deu através de interpolações, utilizando *scripts shell* baseado na linguagem computacional AWK. O método de interpolação utilizado foi a spline suavizada, abordado na sub-seção 4.5.3. Após este processamento, todas as variáveis apresentaram dados sob grid regular de 1° x 1°, para compatibilizar com a resolução espacial dos dados advindos da missão GRACE.

Uma vez solucionada a padronização da espacialidade das observações, foi realizada a conversão das unidades dimensionais, com o objetivo de tornar possível a aplicação matemática. Para isso, todas as variáveis foram convertidas para a unidade mm/mês. A Tabela 5 apresenta as variáveis e seus parâmetros após a etapa de normalização dos dados.

TABELA 5. Processo de conversão de unidades aplicado às variáveis em estudo.

Variável	Unidade Nativa	Conversão	Unidade Pós-Conversão	Fonte
Precipitação (P)	mm/hr	$P*24*d$	mm/mês	TRMM
Total de Água Armazenada (TWS)	m/mês	$(TWS*1000)$	mm/mês	GRACE
Escoamento (R)	kg/m ² s	$(R*(1000*24*3,6*d))$	mm/mês	FLDAS
Evapotranspiração (ET)	kg/m ² s	$(ET*(1000*24*3,6*d))$	mm/mês	GLDAS-2.1

O processo de conversão da precipitação é feito a partir da unidade nativa da variável (mm/hr), sendo multiplicado por 24, o qual corresponde a quantidade de horas de um dia, e multiplicado pela variável d , que corresponde a quantidade de dias de cada mês em específico. A conversão da variável TWS, parte da unidade nativa de m/mês para mm/mês, onde 1 m equivale 1000 mm.

A variável escoamento e a evapotranspiração, originalmente obtidas em kg/m²s, são convertidas em mm/mês. Neste processo, as variáveis são convertidas de kg/m² para mm/d, através do fator de conversão $(1000*24*3,6)$, e posteriormente convertidas para mm/mês.

4.5.3 Métodos Interpoladores

Com o objetivo de se obter o método interpolador que melhor se aplicasse as variáveis em estudo, foram realizados testes para as variáveis precipitação, escoamento e ET do modelo.

A variável TWS, obtida a partir do GRACE, não necessita de interpolação, visto que sua resolução espacial é de 1° x 1°, resolução padrão adotada neste trabalho.

Dentro disso, foram realizados ensaios, utilizando as interpolações *spline*, bicúbica, bilinear e vizinho mais próximo, para os dados do ano de 2003 de todas as bacias hidrográficas em estudo. A metodologia de análise foi baseada na obtenção da estatística descritiva das observações, através do cálculo dos valores de média, desvio padrão, máximo e mínimo para cada mês.

A Tabela 6 apresenta os resultados para análise estatística descritiva para os ensaios realizados utilizando os métodos interpoladores, para os dados de escoamento, obtidos do modelo FLDAS.

TABELA 6. Resultados obtidos através dos ensaios utilizando as interpolações bicúbica, bilinear, spline suavizada e vizinho mais próximo para a variável escoamento (mm).

BICÚBICA					BILINEAR				
MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	24,63	27,34	214,78	0	JAN	24,64	27,04	212,90	0
FEV	33,63	38,35	400,33	0	FEV	33,60	37,98	388,44	0
MAR	40,08	37,60	214,99	0	MAR	40,15	37,41	213,00	0
ABR	33,92	33,98	302,96	0	ABR	34,03	33,97	305,59	0
MAI	23,48	35,89	262,47	-0,04	MAI	23,57	35,79	261,81	0
JUN	16,92	27,95	256,57	-0,00	JUN	17,01	27,83	248,01	0
JUL	11,11	22,71	178,59	-0,21	JUL	11,16	22,71	181,58	0
AGO	7,09	16,30	205,36	-0,13	AGO	7,08	16,23	204,99	0
SET	6,02	13,20	140,77	-0,02	SET	6,02	13,12	140,86	0
OUT	8,85	14,13	101,34	-0,00	OUT	8,82	14,02	98,94	0
NOV	11,31	14,43	120,11	0	NOV	11,27	14,28	119,50	0
DEZ	15,53	20,74	176,97	0	DEZ	15,52	20,62	176,57	0
SPLINE					VIZINHO MAIS PRÓXIMO				
MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	24,64	26,95	212,29	0	JAN	24,79	28,39	213,14	0
FEV	33,58	37,87	384,80	0	FEV	33,71	38,42	393,96	0
MAR	40,14	37,35	212,35	0	MAR	40,10	37,81	204,67	0
ABR	34,03	33,95	306,46	0	ABR	34,30	34,65	308,69	0
MAI	23,58	35,76	261,55	0	MAI	23,84	36,14	249,65	0
JUN	17,02	27,79	245,25	0	JUN	17,12	28,20	271,53	0
JUL	11,17	22,72	182,44	0	JUL	11,32	22,91	178,83	0
AGO	7,08	16,22	204,93	0	AGO	7,13	16,51	214,32	0
SET	6,02	13,10	140,85	0	SET	6,06	13,32	147,53	0
OUT	8,81	13,99	98,15	0	OUT	8,94	14,34	101,82	0
NOV	11,25	14,24	119,32	0	NOV	11,24	14,54	122,70	0
DEZ	15,52	20,59	176,43	0	DEZ	15,64	20,98	162,05	0

A Figura 14 apresenta o desvio padrão dos dados de escoamento, de acordo com os métodos interpoladores utilizados.

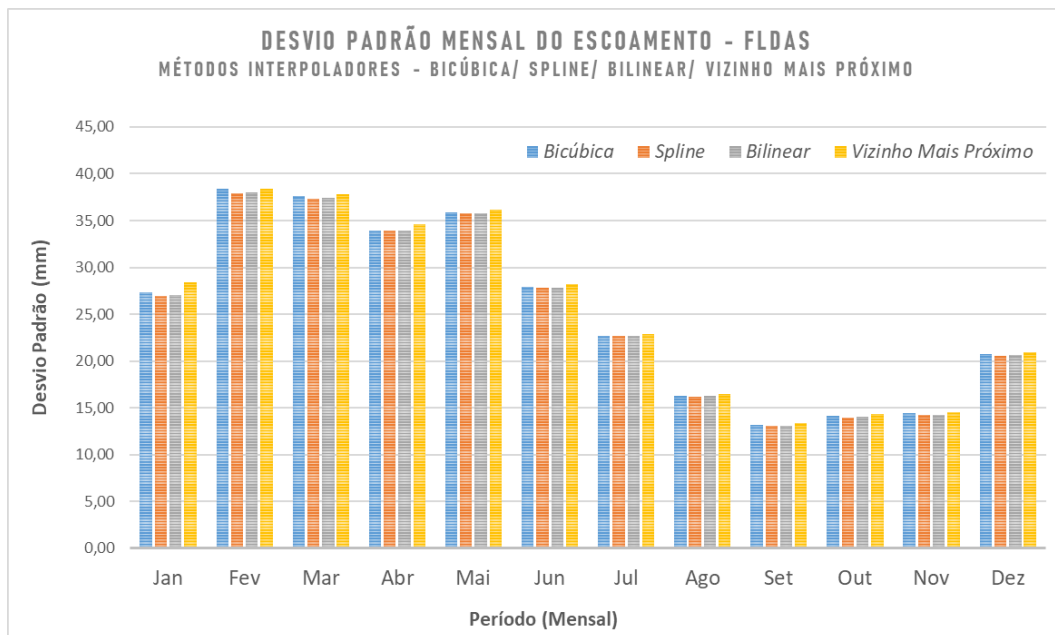


FIGURA 14. Comportamento do desvio padrão médio para a variável escoamento.

A interpolação pelo método vizinho mais próximo apresentou média de 19,51 mm, maior média mensal para a variável escoamento. A menor média apresentada foi 19,38 mm, da interpolação bicúbica. Os valores de máximo variaram de 212,07 mm para a interpolação *spline* a 214,60 mm para a interpolação bicúbica. O desvio padrão, fator de maior interesse no que se diz respeito a decisão de melhor desempenho de métodos interpoladores, teve sua menor variação na interpolação pelo método *spline*, o qual apresentou desvio de 25,04.

A Tabela 7 apresenta os resultados de média, desvio padrão, máximo e mínimo para a variável precipitação, de acordo com o método interpolador utilizado.

TABELA 7. Resultados obtidos através dos ensaios utilizando as interpolações bicúbica, bilinear, spline suavizada e vizinho mais próximo para a variável precipitação (mm).

MÊS	BICÚBICA				MÊS	BILINEAR			
	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO		MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	230,65	133,86	704,72	-0,11	JAN	230,75	132,69	690,74	0
FEV	217,49	116,41	550,99	0	FEV	217,47	115,51	544,41	0
MAR	258,04	133,00	690,48	0	MAR	258,01	131,21	677,82	0
ABR	180,26	115,56	552,91	0	ABR	180,32	114,65	534,12	0
MAI	136,45	128,41	667,97	0	MAI	136,44	127,88	653,51	0

...continua...

Tabela 7, Cont.

JUN	87,81	100,31	623,19	-0,82	JUN	87,93	99,82	621,67	0
JUL	56,90	86,78	465,61	-1,35	JUL	56,97	86,67	459,28	0
AGO	61,29	61,71	462,35	-0,33	AGO	61,24	60,98	455,30	0
SET	73,80	62,14	380,89	-0,35	SET	73,82	61,21	367,57	0
OUT	110,85	79,46	434,03	-0,27	OUT	110,93	78,47	424,82	0
NOV	143,30	71,68	430,32	0	NOV	143,06	70,33	424,07	0
DEZ	162,37	94,33	493,04	0	DEZ	162,14	93,34	489,80	0
SPLINE					VIZINHO MAIS PRÓXIMO				
MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	230,77	132,34	686,17	0	JAN	230,88	134,82	696,61	0
FEV	217,45	115,25	542,99	0	FEV	217,09	116,22	552,54	0
MAR	258,01	130,68	673,77	0	MAR	257,39	131,76	715,43	0
ABR	180,34	114,40	539,70	0	ABR	182,13	117,58	563,09	0
MAI	136,44	127,73	648,82	0	MAI	137,49	129,54	674,65	0
JUN	87,97	99,69	621,33	0	JUN	89,09	103,32	693,60	0
JUL	56,99	86,64	457,17	0	JUL	57,85	89,84	467,62	0
AGO	61,22	60,77	453,29	0	AGO	61,63	62,37	452,36	0
SET	73,83	60,94	363,41	0	SET	73,60	62,40	373,44	0
OUT	110,95	78,18	421,77	0	OUT	110,81	80,02	384,31	0
NOV	142,99	69,93	422,06	0	NOV	143,09	72,51	382,53	0
DEZ	162,06	93,04	488,53	0	DEZ	163,82	96,17	489,34	0

A Figura 15 apresenta o desvio padrão dos dados de precipitação, para os métodos interpoladores correspondentes.

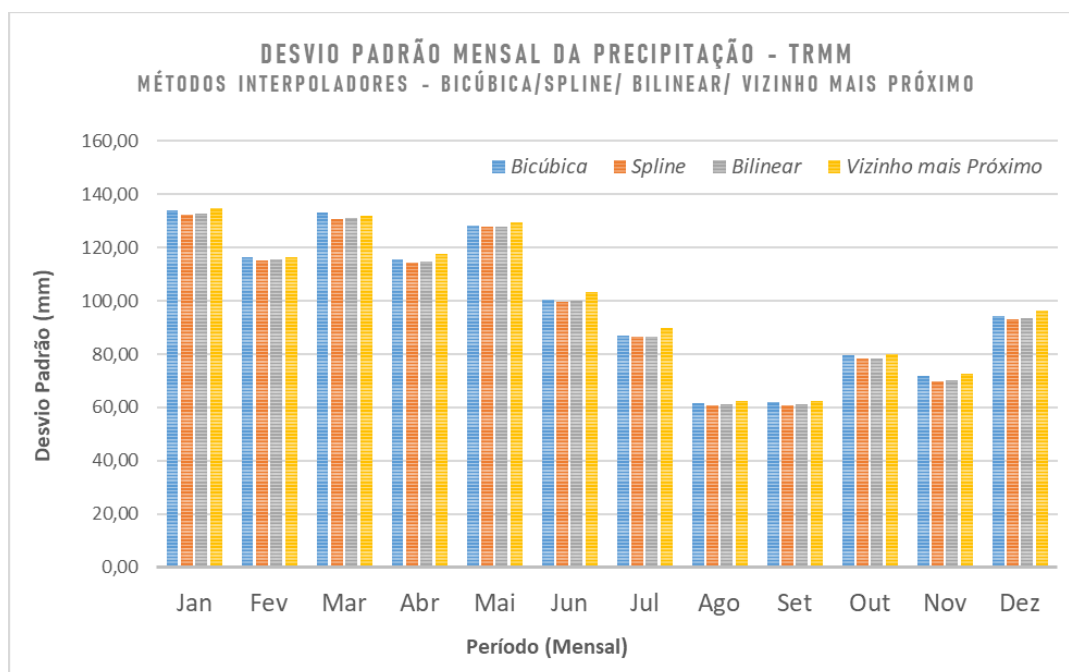


FIGURA 15. Comportamento do desvio padrão médio para a variável precipitação.

A interpolação *spline* apresentou média de 143,25 mm, e desvio padrão de 97,47 mm, valores que correspondem à menor média mensal e ao menor desvio para a variável precipitação, entre os métodos interpoladores utilizados. A maior média mensal, e maior desvio foram apresentados pela interpolação por vizinho mais próximo, com valores da ordem de 143,74 mm e 99,71 mm, respectivamente.

Por fim, a Tabela 8 apresenta os valores obtidos a partir da interpolação dos dados de ET do modelo GLDAS.

TABELA 8. Resultados obtidos através dos ensaios utilizando as interpolações bicúbica, bilinear, spline suavizada e vizinho mais próximo para a variável evapotranspiração (mm).

BICÚBICA					BILINEAR				
MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	107,67	25,03	200,9	0	JAN	107,86	24,55	199,9	0
FEV	110,69	22,43	174,2	0	FEV	110,92	21,80	174,7	0
MAR	104,65	17,70	161,2	0	MAR	104,89	17,02	158,6	0
ABR	102,07	19,67	156,6	0	ABR	102,32	19,08	154,1	0
MAI	98,47	24,54	162,3	0	MAI	98,69	24,08	160,4	0
JUN	90,21	33,85	149,3	0	JUN	90,41	33,58	149,3	0
JUL	83,24	45,22	159,6	0	JUL	83,42	45,02	159,2	0
AGO	71,20	45,04	160,5	0	AGO	71,37	44,88	159,7	0
SET	72,07	44,77	167,5	0	SET	72,26	44,62	167,1	0
OUT	84,65	40,32	167	0	OUT	84,78	40,10	165,8	0
NOV	97,81	29,98	183,2	0	NOV	97,95	29,66	181,9	0
DEZ	104,20	32,90	179,5	0	DEZ	104,31	32,59	178,2	0
SPLINE					VIZINHO MAIS PRÓXIMO				
MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO	MÊS	MÉDIA	DESV. PADRÃO	MÁXIMO	MÍNIMO
JAN	107,77	24,80	199,8	0	JAN	107,86	24,75	205,8	0
FEV	110,82	22,11	174,6	0	FEV	110,79	21,95	171,3	0
MAR	104,75	17,41	157,8	0	MAR	104,94	17,26	160,6	0
ABR	102,19	19,40	153,3	0	ABR	102,30	19,13	153,4	0
MAI	98,52	24,29	160,2	0	MAI	98,80	24,30	164	0
JUN	90,23	33,67	149,3	0	JUN	90,70	33,81	150,5	0
JUL	83,22	45,03	159	0	JUL	83,82	45,18	160,4	0
AGO	71,20	44,88	159,5	0	AGO	71,91	45,23	162,8	0
SET	72,13	44,67	166,9	0	SET	72,77	44,93	167,9	0
OUT	84,72	40,17	165,4	0	OUT	85,04	40,26	168,3	0
NOV	97,89	29,79	181,5	0	NOV	98,02	29,89	180,8	0
DEZ	104,23	32,76	177,7	0	DEZ	104,31	32,65	172,5	0

A Figura 16, apresenta o comportamento do desvio padrão médio para a variável ET do modelo GLDAS, resultante das interpolações realizadas.

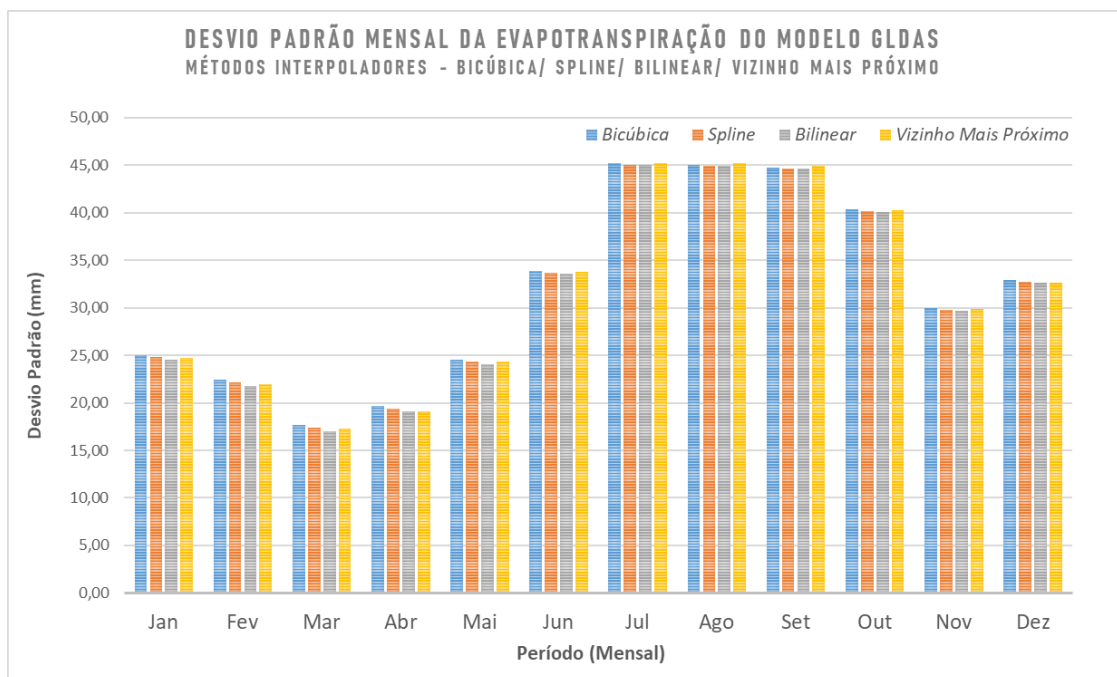


FIGURA 16. Comportamento do desvio padrão médio para a variável ET.

A interpolação bicúbica exibiu a menor média mensal e o maior desvio entre os métodos interpoladores, para a variável ET. A menor média do desvio foi obtida através da interpolação bilinear, apresentando desvio de 31,42.

Em um contexto geral, os resultados apresentados indicam que as interpolações *spline* e bilinear apresentaram melhor desempenho em relação as interpolações bicúbica e vizinho mais próximo. Porém, a interpolação *spline*, se mostrou mais eficaz ao apresentar melhores resultados quando analisado o desvio para as variáveis escoamento e precipitação, enquanto a interpolação bilinear apresentou menor desvio apenas para a variável ET, o que consequentemente estabelece a interpolação *spline* como a mais adequada para este estudo.

4.5.4 Estimativa da ET a partir da missão GRACE

Para estimativa da ET através da missão GRACE, será utilizada a metodologia descrita por Rodell et al., (2004), Ramillien et al., (2005a) e Oliveira et al., (2014), utilizando observações mensais de TWS, combinadas com dados de precipitação e escoamento, com objetivo de solucionar a equação do balanço de massa de água, e obter resultados próximos aos da ET do modelo GLDAS, diretriz de referência a ser utilizada para validação da metodologia.

Na Figura 17, é apresentado de forma detalhada o fluxograma metodológico da etapa de cálculo da ET.

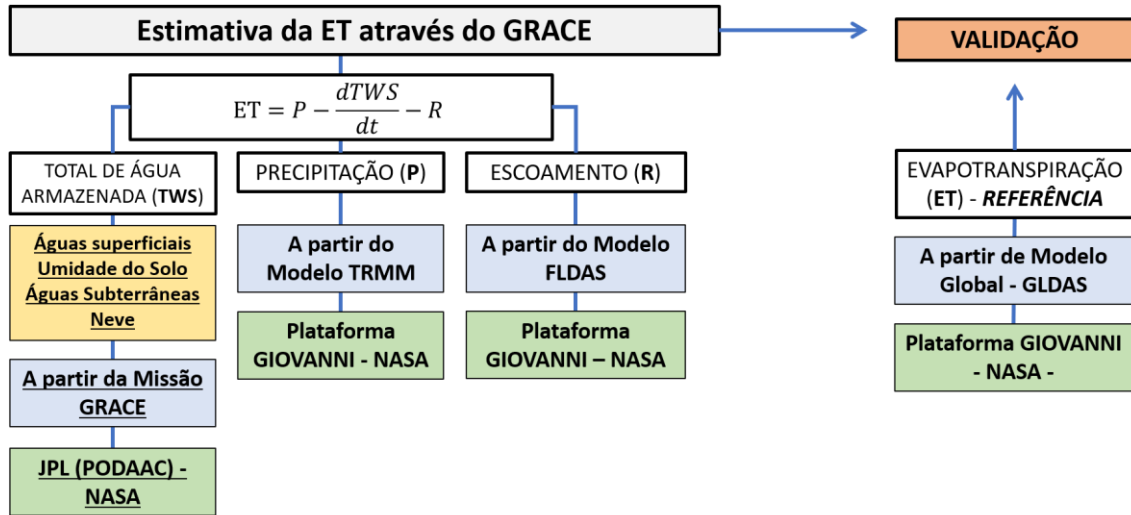


FIGURA 17. Fluxograma metodológico fundamentado em Ramillien et al.(2005a) para estimativa da ET a partir da missão GRACE.

A Equação do Balanço de Massa de Água é dada pela Equação 1:

$$P = \frac{dTWS}{dt} + ET + R. \quad (1)$$

As variáveis P , $\frac{dTWS}{dt}$, ET e R representam respectivamente a precipitação, variação de armazenamento de água com o tempo, evapotranspiração e o escoamento expressos em mm/mês.

Considerando que as observações do GRACE são obtidas como médias mensais da variação do armazenamento de água com o tempo, o $\frac{dTWS}{dt}$ é calculado como a diferença entre dois períodos de tempo para o mesmo ponto, o qual indica a variação média do total de água armazenada, como pode ser observado na Equação 2 (OLIVEIRA et al, 2014):

$$\frac{dw}{dt} \approx \frac{\Delta TWS}{\Delta t} \approx \frac{TWS_{t+1} - TWS_t}{\Delta t} \quad (2)$$

onde $\Delta TWS/\Delta t$ é a variação do total de água armazenada na variação de tempo t .

A evapotranspiração calculada a partir da Equação do Balanço de Massa de Água será validada com base nos valores de referência da evapotranspiração estimada do modelo GLDAS.

Com o objetivo de tornar os outros componentes da Equação do Balanço de Massa de Água comparáveis com as variações mensais do TWS, foi utilizada a média móvel mensal da

precipitação (TRMM) e escoamento (FLDAS), como apresentada na Equação 3 (LONG et al., 2014).

$$\left(\frac{ET_{(t+1)} + ET_t}{2}\right) = \left(\frac{P_{(t+1)} + P_t}{2}\right) - (TWS_{(t+1)} - TWS_t) - \left(\frac{R_{(t+1)} + R_t}{2}\right) \quad (3)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram dispostos de forma a prover análises estatísticas descritivas, gráficos e mapas, apresentados nos subitens 5.1 a 5.2. Com o intuito de se obter a descrição de cada conjunto de dados em estudo, foi realizada a análise mediante a obtenção da média mensal, desvio padrão e valores de mínimo e máximo, para cada uma das variáveis em estudo. O subitem 5.1 aborda a análise estatística descritiva e gráfica da ET calculada, confrontando com os valores da ET nativa do modelo para as regiões hidrográficas em estudo, bem como os resultados e análises das séries temporais integrando o comportamento das variáveis em estudo e a indicação dos coeficientes de correlação entre as ETs. O subitem 5.1 apresenta também o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima e as matrizes de correlação entre as variáveis utilizadas no estudo. O subitem 5.2 apresenta uma breve discussão dos resultados apresentados.

Na etapa de processamento dos dados, foram gerados mapas para a série temporal da ET Calculada e ET do Modelo, com a finalidade de análise visual dos dados espacializados, os quais possibilitam a confrontação entre o comportamento das ETs, detecção de outliers, anomalias e possíveis erros na etapa de processamento. As Figuras 18 e 19 correspondem a série temporal da ET calculada e ET do modelo, respectivamente, para o mês de janeiro ao longo da série, o qual corresponde ao mês de maior média mensal ao longo da série para 4 das 5 bacias em estudo.

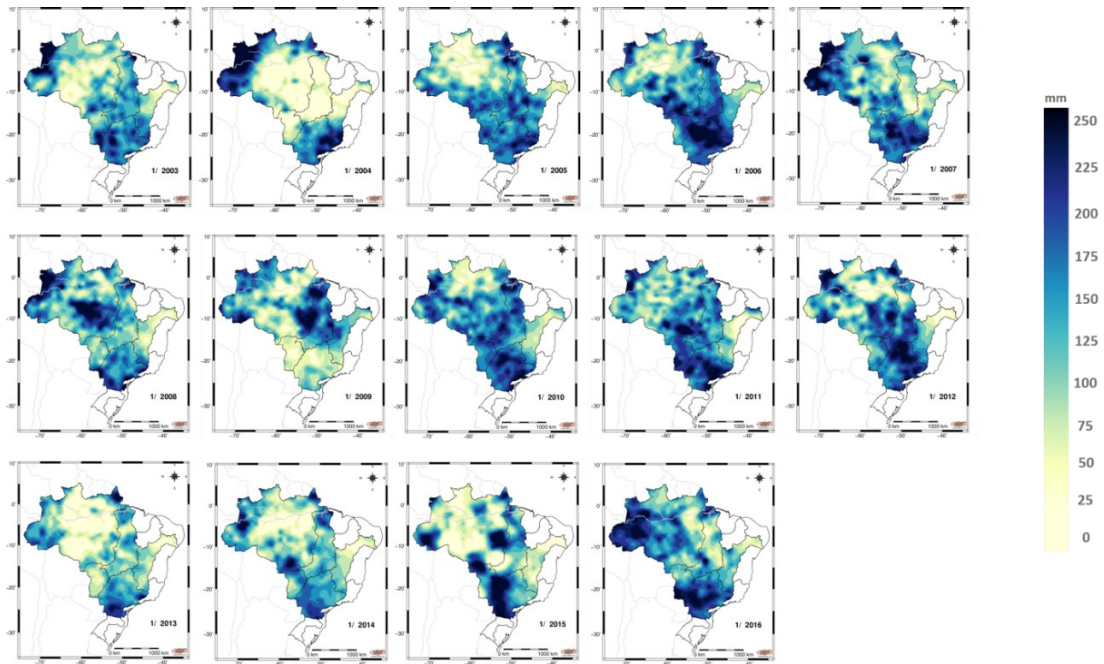


FIGURA 18. Série Temporal dos Mapas de Média Mensal da ET Calculada, para o mês de janeiro de 2003 a 2016, para as bacias hidrográficas em estudo.

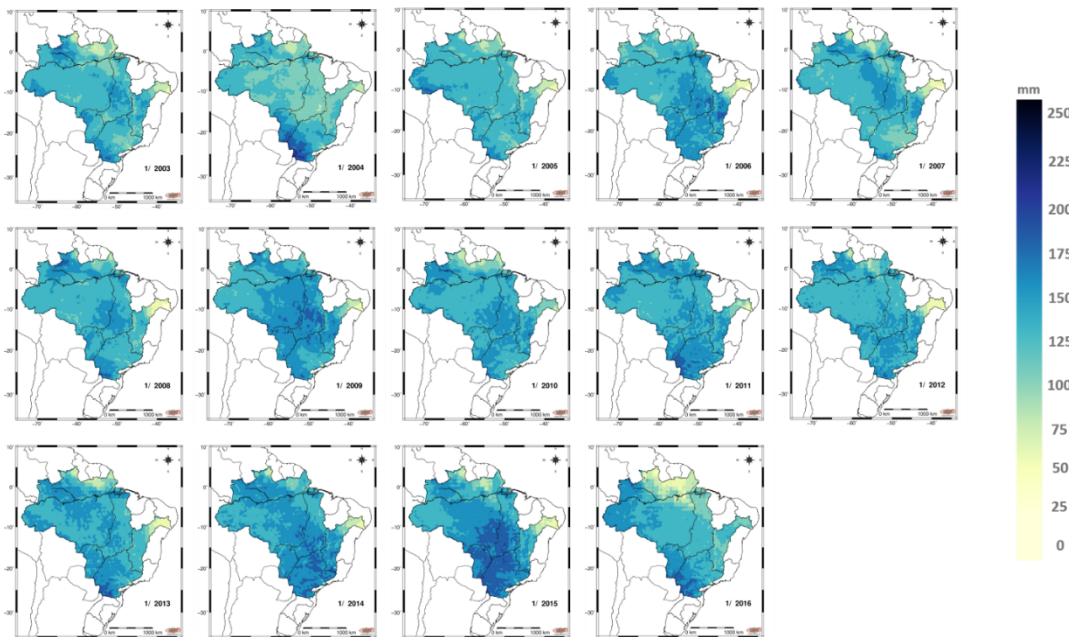


FIGURA 19. Série Temporal dos Mapas de Média Mensal da ET do Modelo, para o mês de janeiro de 2003 a 2016, para as bacias hidrográficas em estudo.

As figuras 20 e 21 correspondem ao comportamento da ET calculada e ET do modelo, respectivamente, ao longo da série temporal, para o mês de agosto de 2003 a 2016, que corresponde ao mês de menor média mensal ao longo da série de dados em estudo.

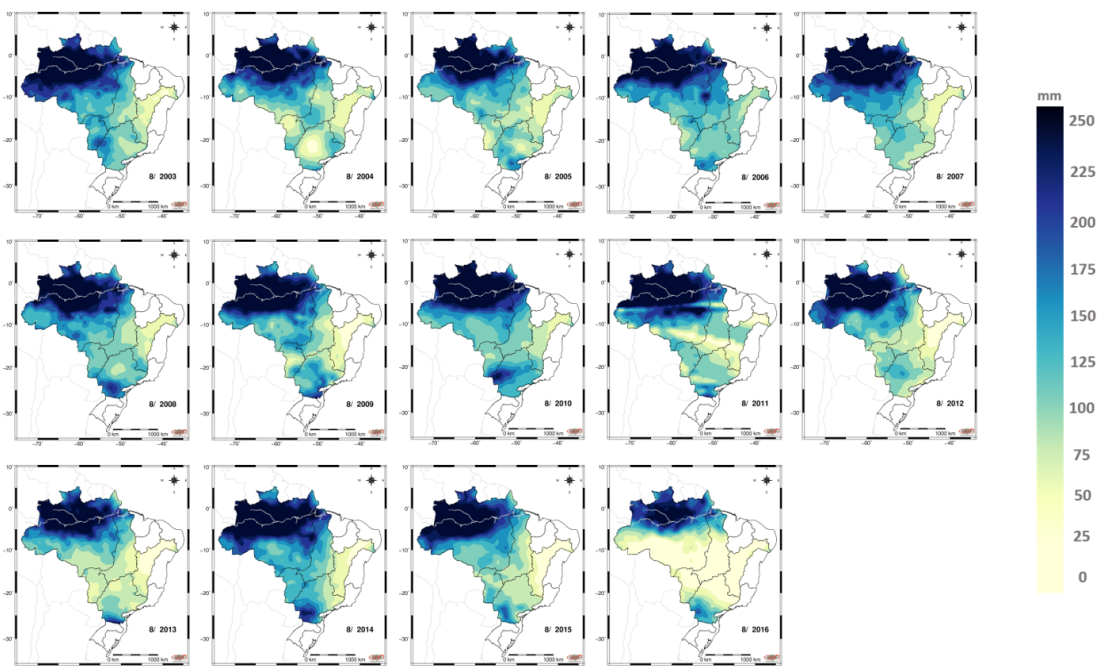


FIGURA 20. Série Temporal dos Mapas de Média Mensal da ET Calculada, para o mês de agosto de 2003 a 2016, para as bacias hidrográficas em estudo.

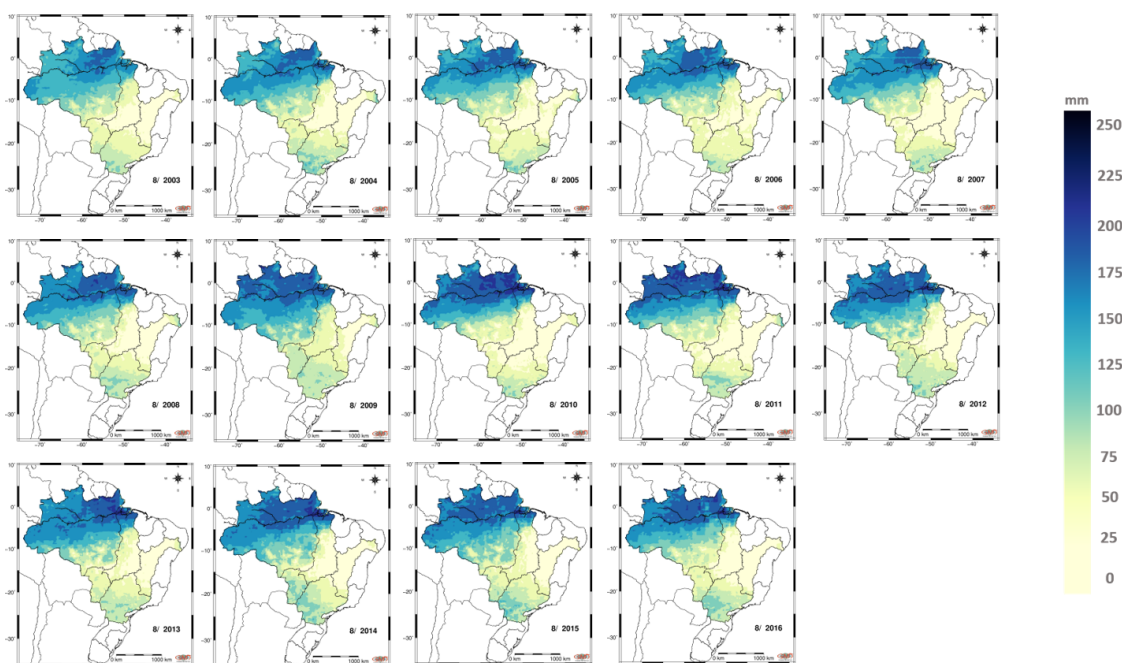


FIGURA 21. Série Temporal dos Mapas de Média Mensal da ET do Modelo, para o mês de agosto de 2003 a 2016, para as bacias hidrográficas em estudo.

Através da análise visual dos mapas, é possível observar um comportamento similar para as regiões de baixa média mensal da ET calculada e ET nativa do modelo. Essa análise de similaridade fica ainda mais notável quando observadas as bacias do Tocantins Araguaia,

Paraguai, São Francisco e parte da Bacia do Paraná. Para as Figuras 18 e 19, correspondentes ao mês de janeiro, mês de maior média da ET para as bacias, a diferença entre a ET calculada e ET do modelo, se mostra notória, com destaque para a região da Bacia Amazônica, a qual concentra as maiores diferenças visuais entre as Figuras 18 e 19, e Figuras 20 e 21.

Com a finalidade de apresentar o comportamento das variáveis ET calculada e ET do modelo GLDAS ao longo da série temporal dos dados, foram gerados gráficos considerando os valores médios mensais. A fim de analisar o comportamento temporal ao longo dos meses, foram gerados gráficos que indicam a média mensal para a ET calculada e ET do modelo ao longo da série de dados, assim como o comportamento temporal das variáveis precipitação, escoamento, TWS e sua variação ao longo do tempo ($dTWS/dt$) e ET do modelo GLDAS ao longo da série temporal dos dados.

Além disso, foram indicados o grau de correlação entre a ET calculada e ET do modelo para cada uma das bacias em estudo. A indicação do grau de relação entre duas variáveis é estabelecida pelo coeficiente de correlação de Pearson. Por meio deste, são obtidos valores da ordem de -1 a 1, que indicam o grau de dependência linear entre duas variáveis quantitativas, possuindo relação mais forte na medida em que os valores se aproximam de -1 e 1, sendo valores negativos indicativos de um comportamento inverso, no qual uma variável diminui na medida em que a outra variável aumenta, e valores positivos indicativos de um aumento entre as duas variáveis, ou seja, existência de uma relação linear positiva. Um coeficiente de correlação próximo de zero, aponta que não há relação entre as duas variáveis. (JOHNSON; WICHERN, 2007).

Com o intuito de analisar a variabilidade das diferenças entre a ET calculada e ET do modelo ao longo das bacias em estudo, foram utilizados dados dos meses de janeiro e agosto, meses que respectivamente são definidos como meses de alto e baixo volume de precipitação, e conseqüentemente de ET ao longo da série histórica de dados. A utilização do script `analise.sh` possibilitou a quantificação e geovisualização das diferenças por pontos ao longo de toda a extensão das bacias.

Por fim, a matriz de correlação de Pearson consiste em uma matriz bi-dimensional composta pelas correlações existentes entre as variáveis em estudo. A visualização gráfica das correlações entre as variáveis possibilita a identificação das correlações significativas, o que otimiza o processo de análise de resultados.

5.1 Bacia Amazônica

A Figura 22 exibe os resultados para a Bacia Amazônica, apresentando o comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, o comportamento médio ao longo dos meses e indica também o grau de correlação entre as duas variáveis.

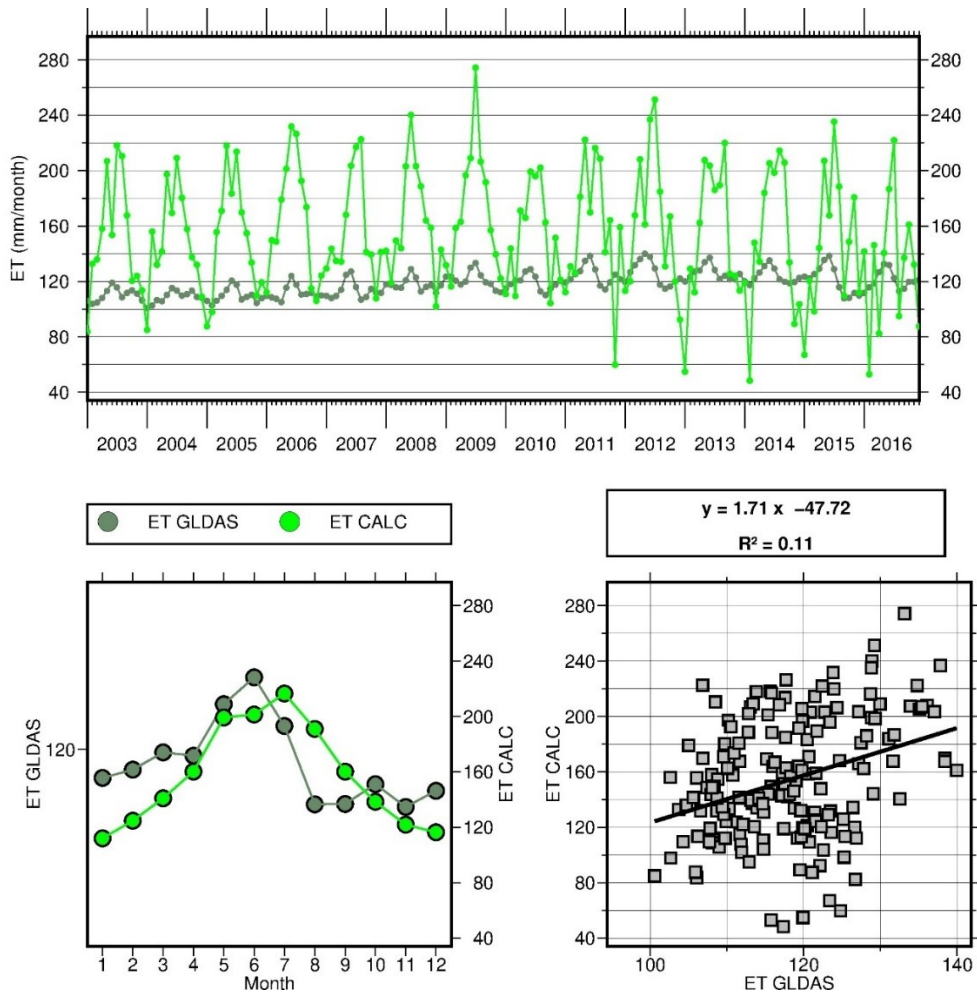


FIGURA 22. Comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, comportamento médio ao longo dos meses e o grau de correlação entre as ETs para a bacia Amazônica.

O gráfico demonstra um comportamento cíclico bem definido ao longo dos anos. Embora os valores da ET calculada sejam mais elevados do que os valores da ET nativa do GLDAS em grande parte da série, a dinâmica de períodos com maior taxa de ET e períodos de baixa ET são similares, no que se diz respeito à temporalidade. É possível observar uma maior discrepância entre os dados para períodos de maior disponibilidade hídrica, e uma maior proximidade entre as ETs nos períodos de baixa disponibilidade hídrica até o ano de 2011. A

partir deste ano, a ET calculada passou a demonstrar maior discrepância em relação à ET do modelo até mesmo em períodos de baixa disponibilidade hídrica. Os meses de abril, maio, outubro e novembro apresentaram as menores diferenças entre a média por mês para ET calculada e a ET do modelo, e os meses de janeiro, fevereiro, agosto e dezembro apresentaram as maiores diferenças. A análise de correlação indica um coeficiente de correlação de 0,11, o que indica uma baixa relação entre as variáveis. A Tabela 9 expõe os resultados obtidos através da análise descritiva dos dados para a Bacia Amazônica.

TABELA 9. Análise descritiva de mínima, máxima e média ET para a bacia Amazônica.

Bacia Amazônica	
Mínima ET calculada: 48,36 mm/mês	Mínima ET do modelo: 100,61 mm/mês
Máxima ET calculada: 274,35 mm/mês	Máxima ET do modelo: 139,93 mm/mês
Média da ET calculada: 154,58 mm/mês	Média da ET do modelo: 118,12 mm/mês

A tabela demonstra uma diferença média entre a ET calculada e a ET do modelo de 36,46 mm/mês. A alta diferença entre os valores de mínimo e máximo, reforçam a baixa correlação existente entre as duas variáveis.

A Figura 23 apresenta o comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, escoamento e precipitação ao longo da série e o comportamento médio ao longo dos meses.

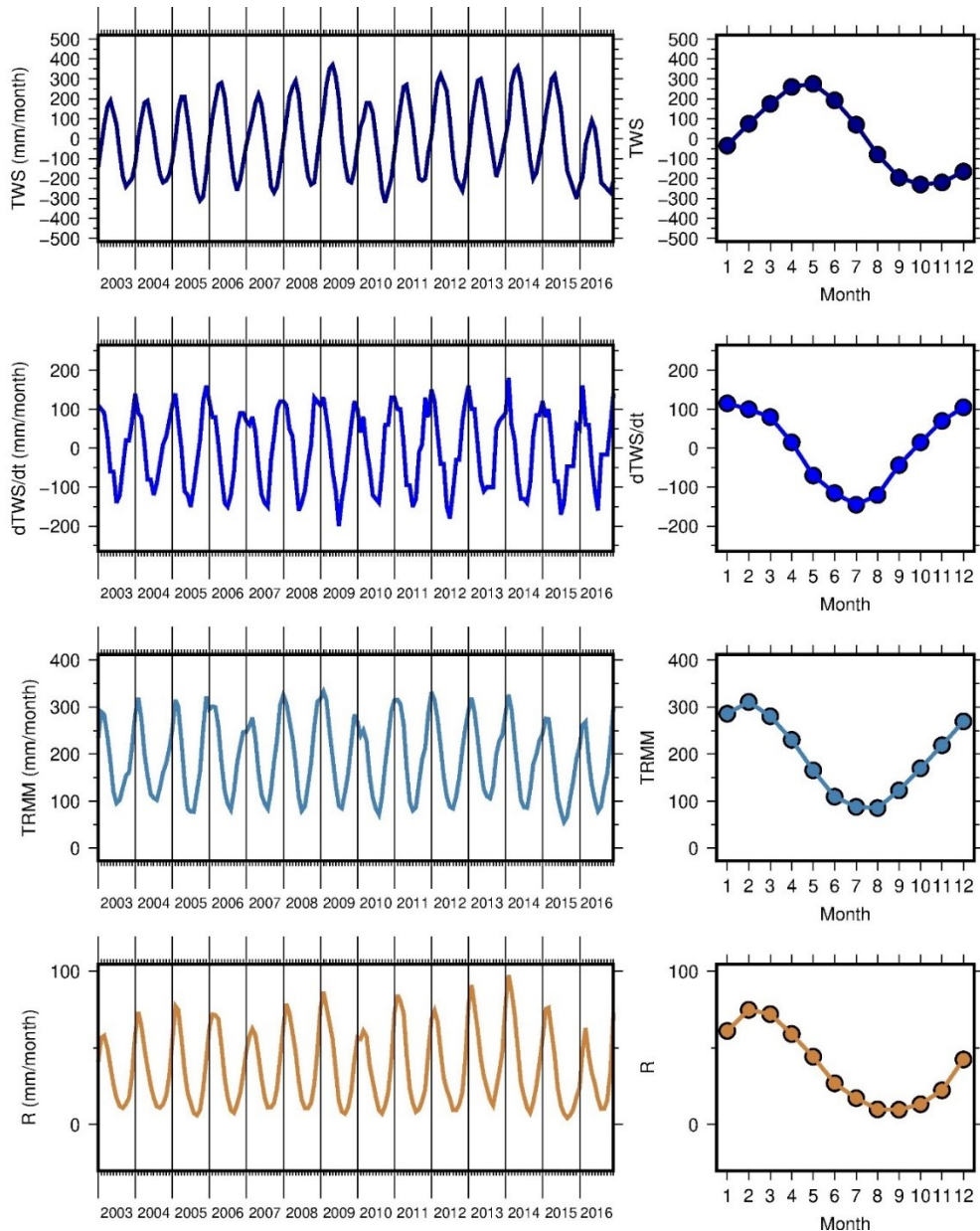


FIGURA 23. Gráfico do comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, precipitação e escoamento ao longo da série, para a bacia Amazônica.

A figura demonstra um comportamento similar entre as variáveis total de água armazenada variando nos intervalos de tempo, precipitação e escoamento. A dinâmica apresentada pelas variáveis ao longo dos meses mostra-se conforme a dinâmica do ciclo hidrológico, com períodos bem definidos de alta e baixa disponibilidade hídrica nos períodos de dezembro a maio, e junho a novembro, respectivamente.

As Figuras 24 e 25 apresentam o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima para a Bacia Amazônica, para os meses janeiro e agosto ao longo de toda a série de dados, os quais

respectivamente correspondem aos valores de máximo e mínimo da ET média mensal calculada.

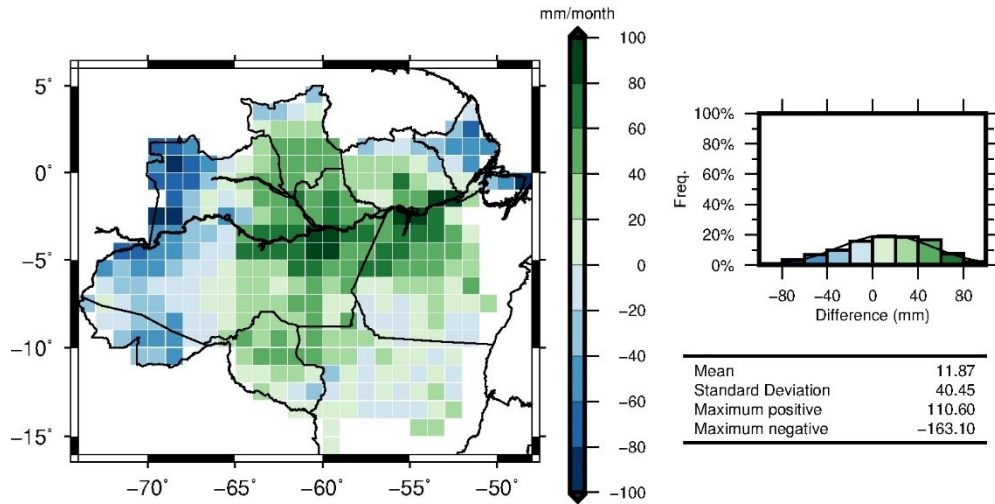


FIGURA 24. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de janeiro para a Bacia Amazônica.

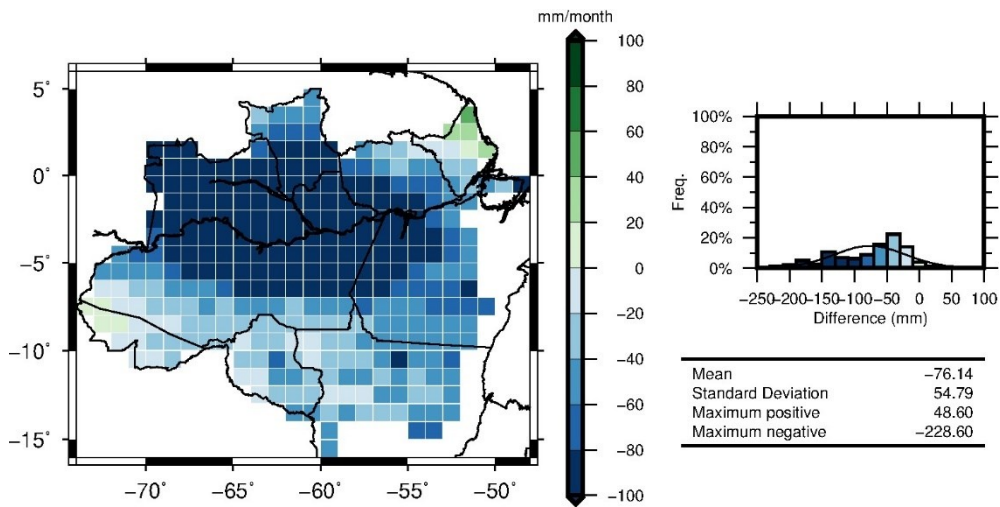


FIGURA 25. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de agosto para a Bacia Amazônica.

A Figura 26 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis Precipitação (TRMM), ET (GLDAS), Escoamento (FLDAS) e $dTWS/dt$ (GRACE), para a Bacia Amazônica.

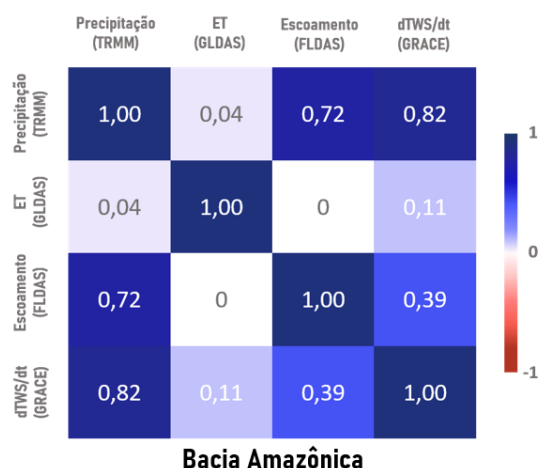


FIGURA 26. Matriz de correlação entre as variáveis precipitação, ET do modelo, escoamento e dTWS/dt, para a Bacia Amazônica.

Nota-se que para a Bacia Amazônica, a maior correlação se deu entre as variáveis dTWS/dt e precipitação, com coeficiente de 0,82, o que expressa uma correlação forte entre as variáveis. A menor correlação registrada se deu entre a ET do modelo e o escoamento, com coeficiente igual a 0, o qual revela correlação inexistente entre as variáveis, e representa a menor correlação obtida entre as variáveis me estudo.

5.2 Bacia do Paraguai

A Figura 27 apresenta os resultados para a Bacia do Paraguai, apresentando o comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET do modelo de 2003 a 2016, o comportamento médio ao longo dos meses e indica também o coeficiente de correlação entre as duas variáveis.

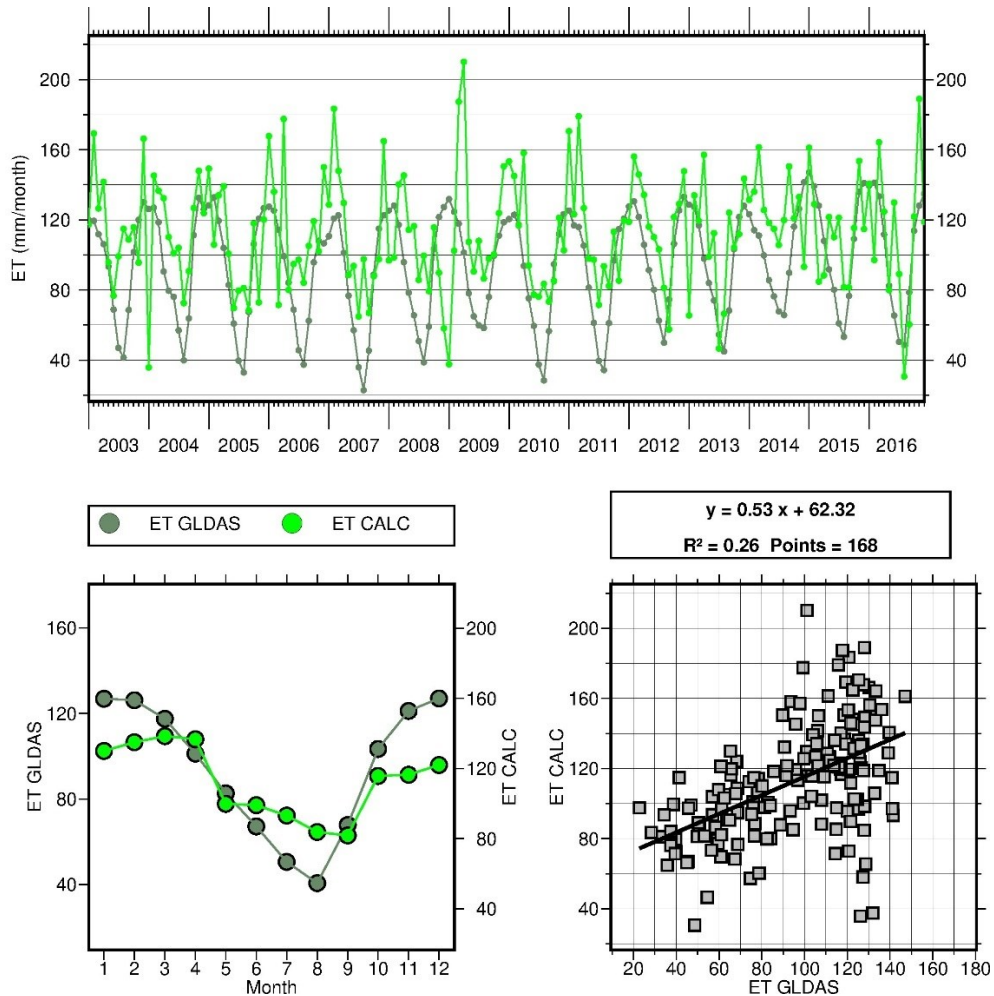


FIGURA 27. Comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, comportamento médio ao longo dos meses e o grau de correlação entre as ETs para a bacia do Paraguai.

O gráfico apresenta similaridade temporal nos períodos de alta e baixa entre a ET calculada e ET do modelo. O comportamento cíclico é bem definido para ambas as ETs, conforme está diretamente relacionada à disponibilidade hídrica e ciclo hidrológico. As maiores discrepâncias existentes entre as ETs se deram nos períodos de alta, onde a ET calculada exibiu valores significativamente mais altos do que a ET nativa do modelo. Os períodos de baixa ET apresentaram uma menor diferença entre a ET calculada e ET do modelo, quando se comparado aos períodos de alta taxa evapotranspirativa.

Os meses de março, abril, maio e setembro apresentaram as menores diferenças entre a média por mês para ET calculada e a ET do modelo, e os meses de janeiro, agosto, novembro e dezembro apresentaram as maiores diferenças. A análise apresenta coeficiente de correlação de 0,25, o que indica baixa relação entre as variáveis. A Tabela 10 expõe os resultados obtidos através da análise descritiva dos dados para a Bacia do Paraguai.

TABELA 10. Análise descritiva de mínima, máxima e média ET para a bacia do Paraguai.

Bacia do Paraguai	
Mínima ET calculada: 30,63 mm/mês	Mínima ET do modelo: 22,81 mm/mês
Máxima ET calculada: 210,17 mm/mês	Máxima ET do modelo: 147,06 mm/mês
Média da ET calculada: 112,76 mm/mês	Média da ET do modelo: 94,85 mm/mês

A tabela demonstra uma diferença média entre a ET calculada e a ET do modelo de 17,91 mm/mês. A diferença entre os valores de mínimo para as ETs foi de 7,82 mm/mês e a diferença entre os valores de máximo de 63,11 mm/mês. Estes números reiteram a alta discrepância existente entre os valores de ET calculada e ET do modelo para os períodos de alta ET.

A Figura 28 apresenta o comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, escoamento e precipitação ao longo da série e o comportamento médio ao longo dos meses.

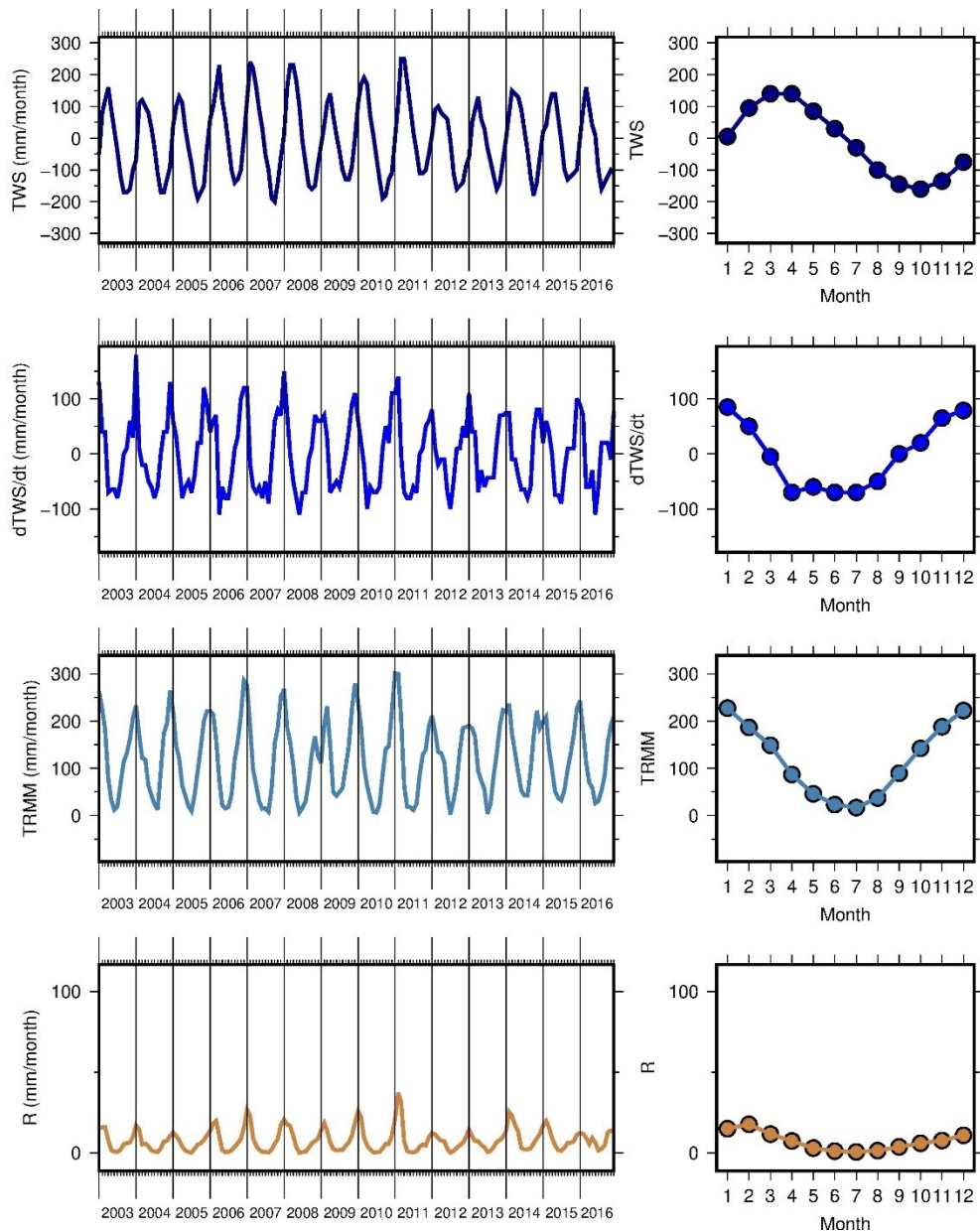


FIGURA 28. Gráfico do comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, precipitação e escoamento ao longo da série, para a bacia do Paraguai.

A figura apresenta um comportamento similar entre as variáveis total de água armazenada variando nos intervalos de tempo, precipitação e escoamento. A correlação entre as variáveis utilizadas e o ciclo hidrológico fica evidente quando observada a dinâmica anual dos períodos de alta e baixa disponibilidade hídrica. Quando analisada a média para os meses, a variável escoamento demonstrou baixa variabilidade quando comparada às variáveis precipitação e variação de armazenamento de água com o tempo, que apresentaram comportamento similar.

As Figuras 29 e 30 apresentam o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima para a

Bacia do Paraguai, para os meses janeiro e agosto ao longo de toda a série de dados, os quais respectivamente correspondem aos valores de máximo e mínimo da ET média mensal calculada.

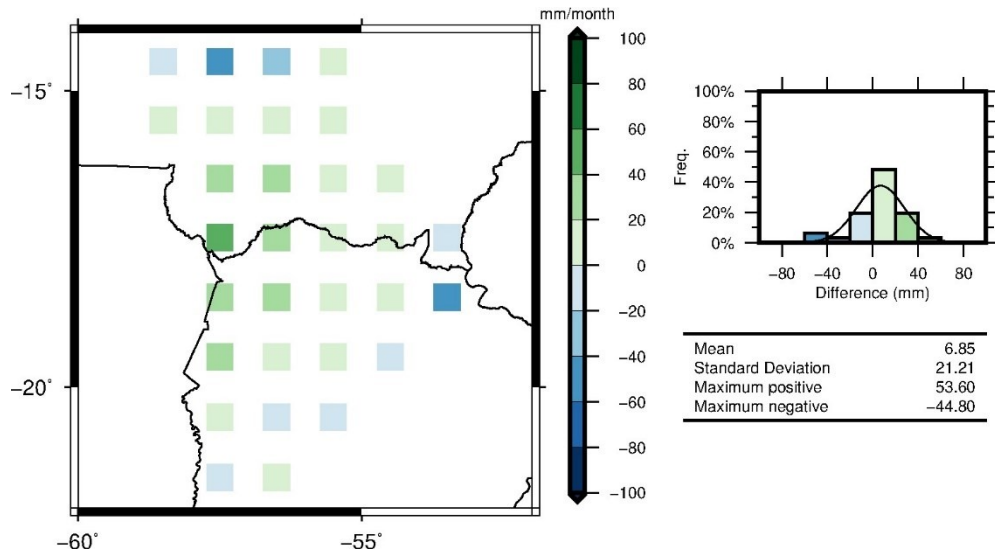


FIGURA 29. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de janeiro para a Bacia do Paraguai.

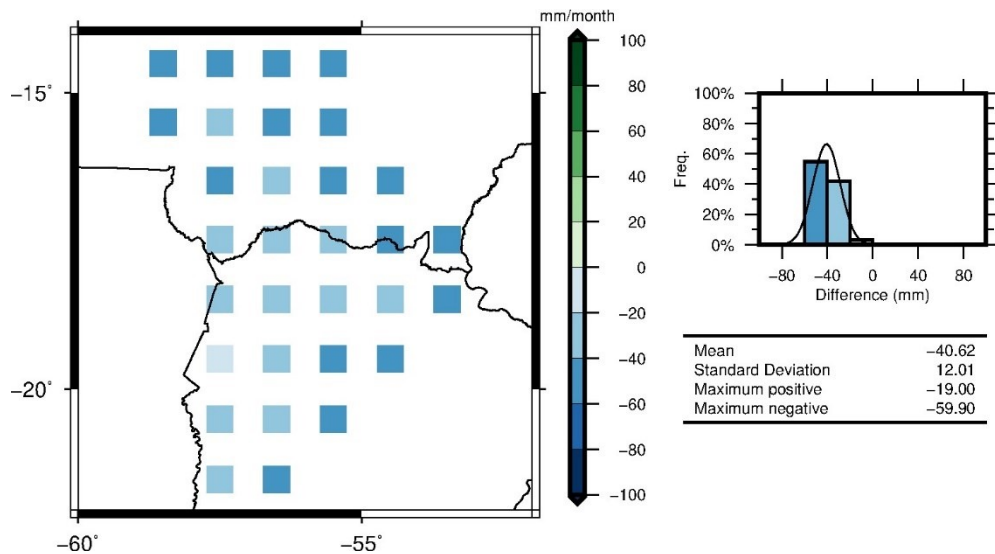


FIGURA 30. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de agosto para a Bacia do Paraguai.

A Figura 34 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis Precipitação (TRMM), ET (GLDAS), Escoamento (FLDAS) e dTWS/dt (GRACE), para a Bacia do Paraguai.

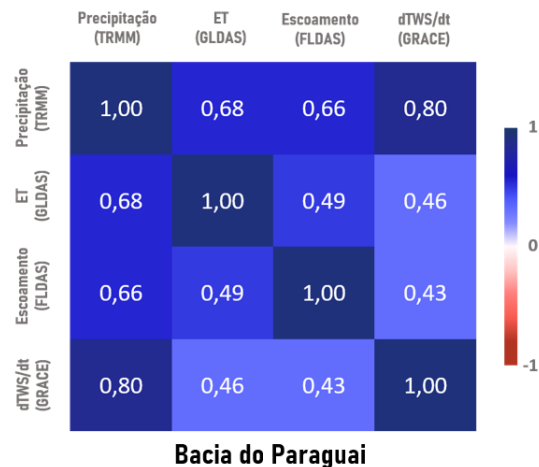


FIGURA 31. Matriz de correlação entre as variáveis precipitação, ET do modelo, escoamento e dTWS/dt, para a Bacia do Paraguai.

A Bacia do Paraguai apresentou alta correlação entre as variáveis dTWS/dt e precipitação, com coeficiente de correlação de 0,80, e correlação moderada entre as variáveis dTWS/dt e escoamento, com coeficiente de correlação de 0,43, as quais representam a correlação máxima e mínima existente entre as variáveis.

5.3 Bacia do Paraná

A Figura 32 apresenta os resultados da análise para a Bacia do Paraná, demonstrando como se comportam as variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, o comportamento médio das ETs ao longo dos meses e indica também o coeficiente de correlação entre a ET calculada e ET do modelo.

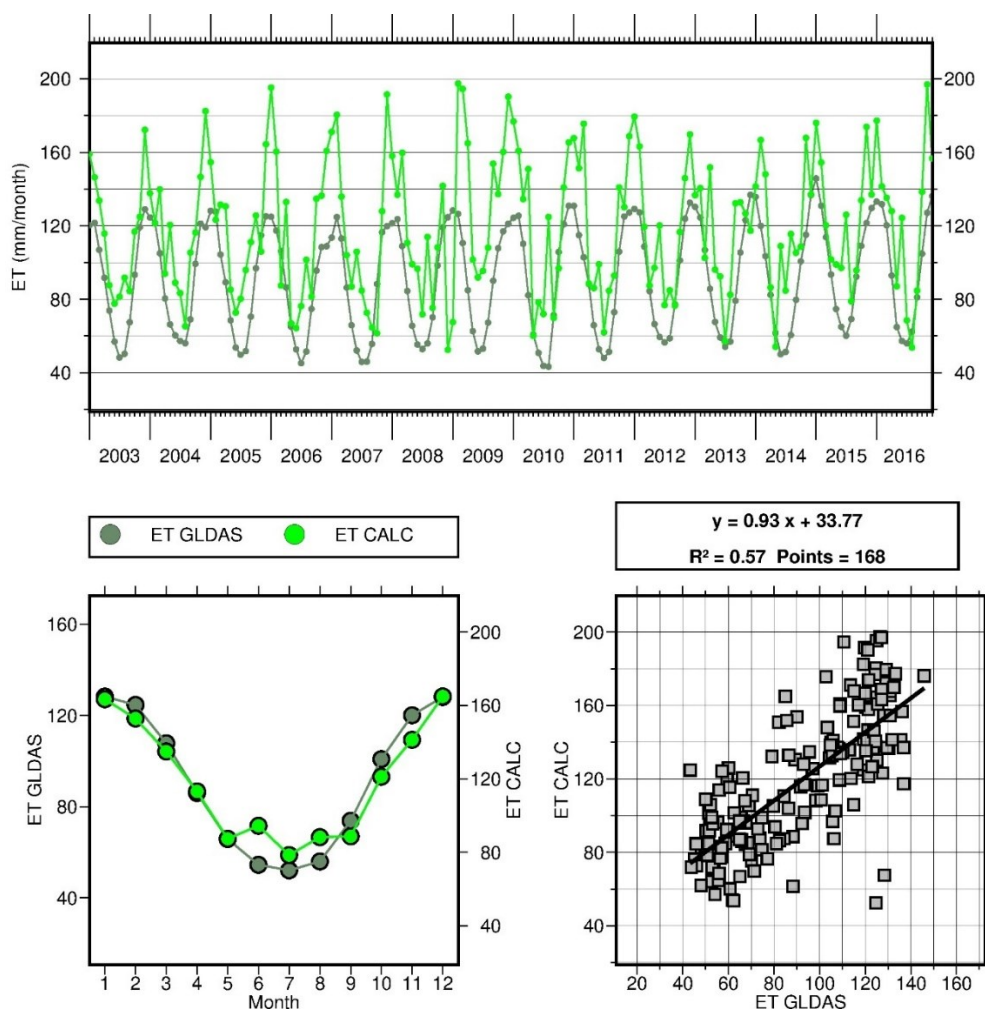


FIGURA 32. Comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, comportamento médio ao longo dos meses e o grau de correlação entre as ETs para a bacia do Paraná.

O gráfico demonstra um comportamento cíclico bem definido ao longo da série temporal de dados. A Bacia do Paraná apresentou um coeficiente de correlação de 0,57, o que indica uma correlação moderada entre a ET calculada e ET do modelo. Como pode ser observado nos gráficos, a diferença entre as ETs se mostrou baixa nos períodos de baixa taxa evapotranspirativa, indicando proximidade entre os valores de ET calculada e ET do modelo. Já nos meses de alta disponibilidade hídrica e consequente alta nas taxas evapotranspirativas, houve maior discrepância dos valores entre as ETs. Quando analisada a abordagem mensal, pode se observar que houve uma proximidade significativa entre os dados da ET calculada e ET do modelo para todos os meses, salvo exceção dos meses de junho e agosto, que apresentaram maior discrepância entre os dados. A Tabela 11 expõe os resultados obtidos através da análise descritiva dos dados para a Bacia do Paraná.

TABELA 11. Análise descritiva de mínima, máxima e média ET para a bacia do Paraná.

Bacia do Paraná	
Mínima ET calculada: 52,46 mm/mês	Mínima ET do modelo: 43,30 mm/mês
Máxima ET calculada: 197,49 mm/mês	Máxima ET do modelo: 145,78 mm/mês
Média da ET calculada: 119,30 mm/mês	Média da ET do modelo: 91,59 mm/mês

A tabela demonstra uma diferença média entre a ET calculada e a ET do modelo de 17,91 mm/mês. A diferença entre os valores de mínimo para as ETs foi de 7,82 mm/mês e a diferença entre os valores de máximo de 63,11 mm/mês. Estes números reiteram a alta discrepância existente entre os valores de ET calculada e ET do modelo para os períodos de alta ET.

A Figura 33 apresenta o comportamento temporal das variáveis TWS, dTWS/dt, escoamento e precipitação ao longo da série e o comportamento médio ao longo dos meses.

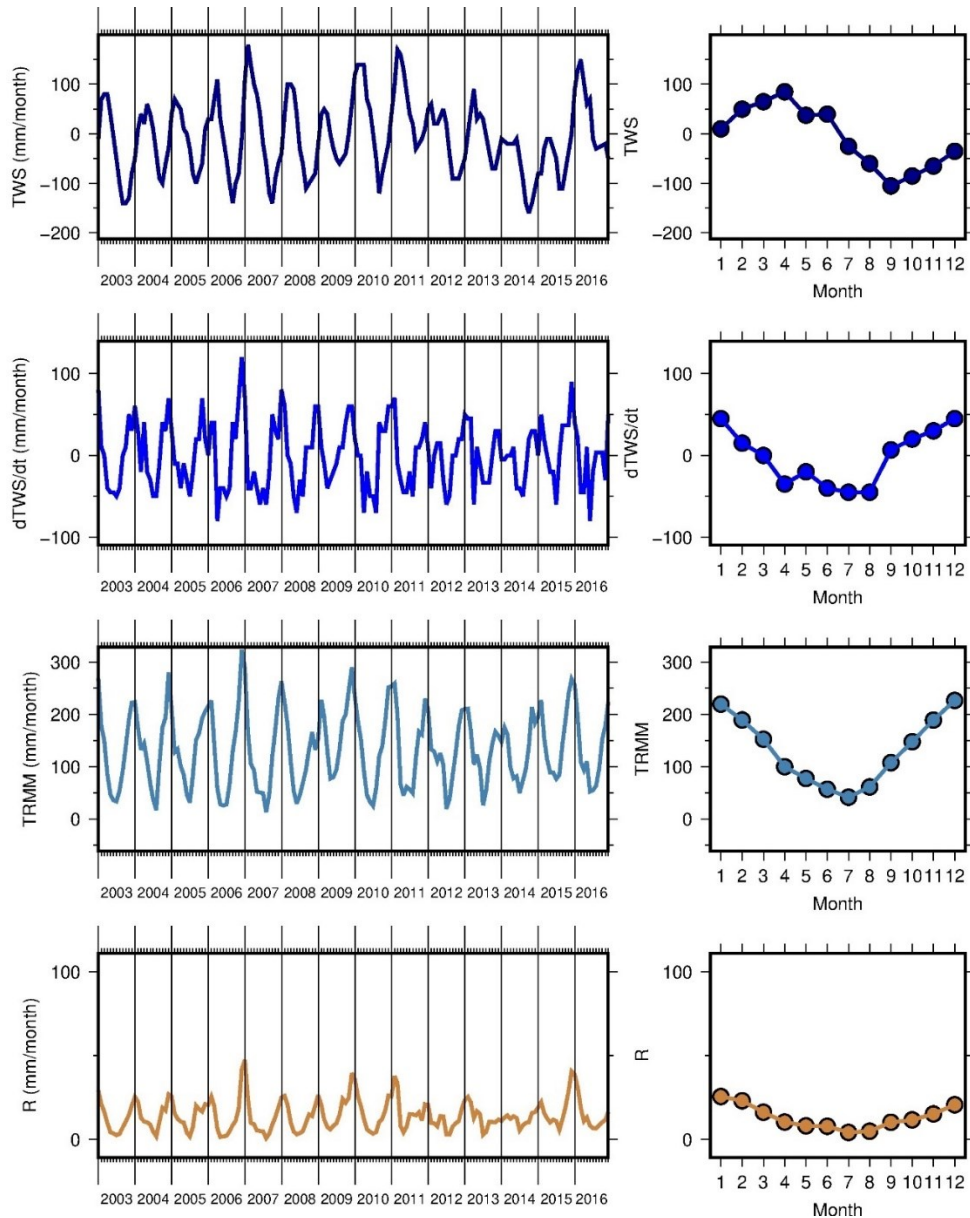


FIGURA 33. Gráfico do comportamento temporal das variáveis TWS, dTWS/dt, precipitação e escoamento ao longo da série, para a bacia do Paraná.

A figura apresenta um comportamento semelhante entre as variáveis total de água armazenada variando nos intervalos de tempo, precipitação e escoamento. O comportamento das variáveis demonstra a relação com a dinâmica anual do ciclo hidrológico e a variabilidade dos períodos de alta e baixa disponibilidade hídrica. Quando analisada a média para cada mês, a variável escoamento demonstrou baixa variabilidade quando comparada às variáveis precipitação e variação de armazenamento de água com o tempo, que apresentaram similaridade no comportamento ao longo dos meses.

As Figuras 34 e 35 apresentam o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima para a Bacia do Paraná, para os meses janeiro e agosto ao longo de toda a série de dados, os quais respectivamente correspondem aos valores de máximo e mínimo da ET média mensal calculada.

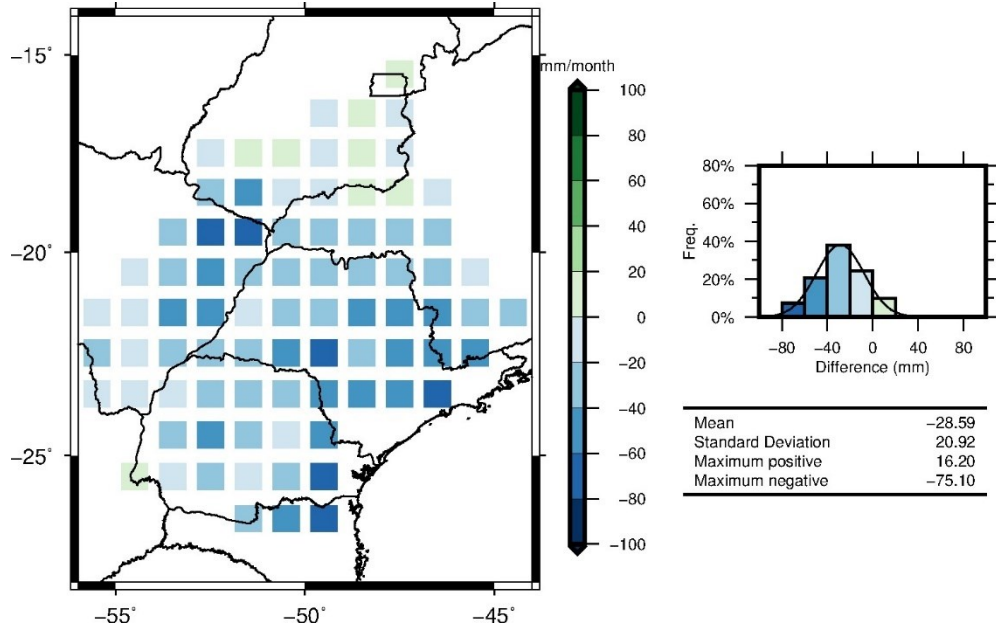


FIGURA 34. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de janeiro para a Bacia do Paraná.

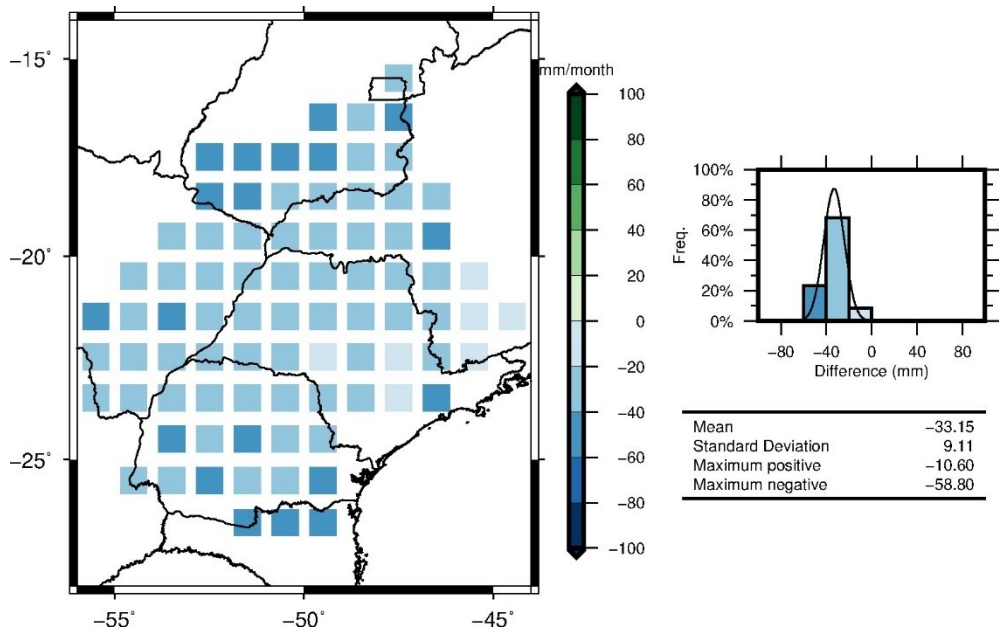


FIGURA 35. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de agosto para a Bacia do Paraná.

A Figura 34 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis Precipitação (TRMM), ET (GLDAS), Escoamento (FLDAS) e dTWS/dt (GRACE), para a Bacia do Paraná.

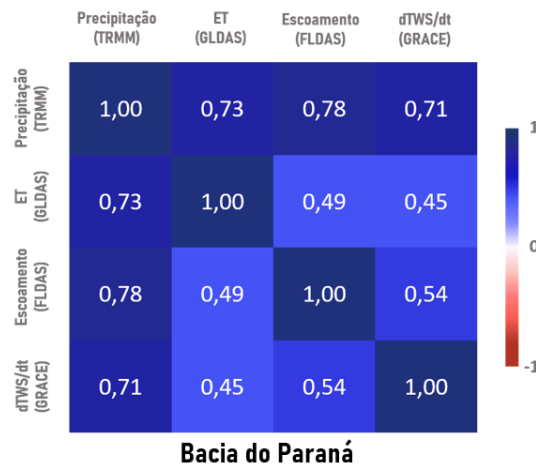


FIGURA 36. Matriz de correlação entre as variáveis precipitação, ET do modelo, escoamento e dTWS/dt, para a Bacia do Paraná.

Para a Bacia do Paraná, os coeficientes de correlação variaram de 0,45 a 0,78, os mesmos referentes a relação entre as variáveis dTWS/dt e a ET do modelo, e entre as variáveis escoamento e precipitação, respectivamente. O coeficiente de correlação de 0,78 indica forte correlação entre as variáveis.

5.4 Bacia do São Francisco

A Figura 37 exibi os resultados para a Bacia do São Francisco, apresentando o comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET do modelo ao longo da série temporal de dados, o comportamento médio ao longo dos meses e indica também o grau de correlação entre as duas variáveis.

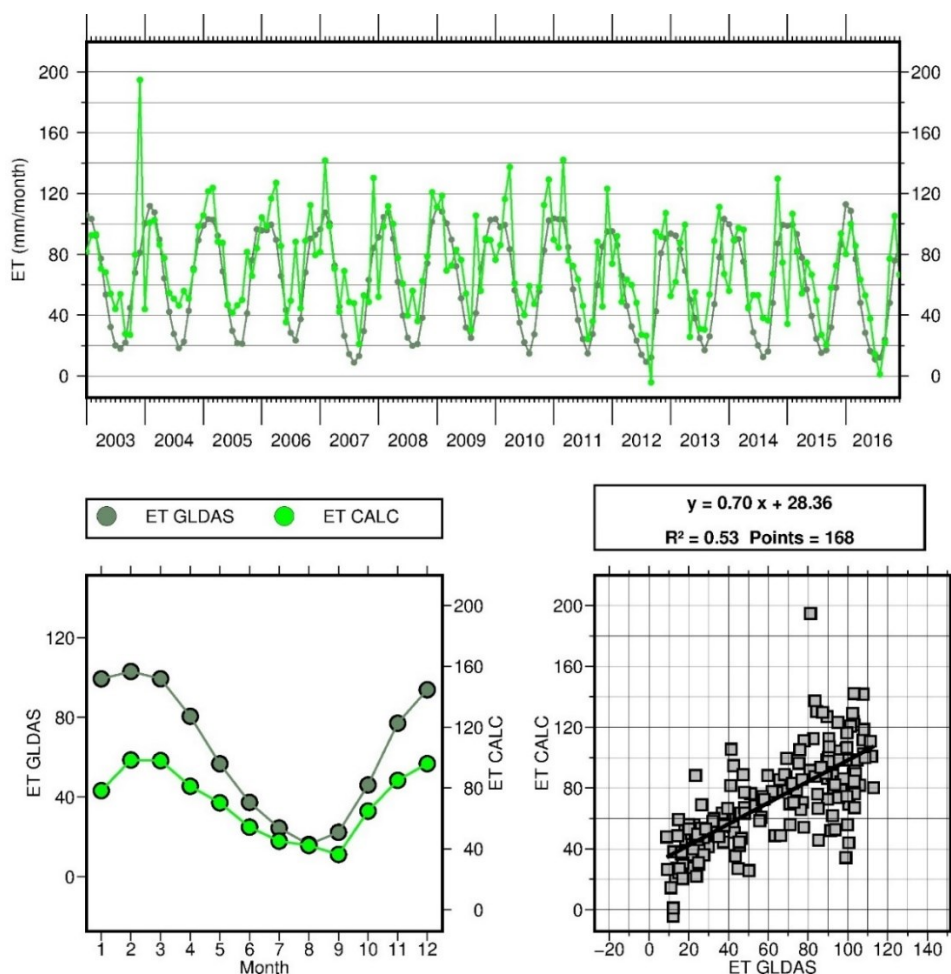


FIGURA 37. Comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, comportamento médio ao longo dos meses e o grau de correlação entre as ETs para a bacia do São Francisco.

A Bacia do São Francisco apresentou um coeficiente de correlação de 0,53, o que indica uma correlação moderada entre a ET calculada e ET do modelo. Como pode ser observado nos gráficos, assim como nas bacias Amazônica, Paraguai e Paraná, a diferença entre as ETs se mostrou baixa nos períodos de baixa taxa evapotranspirativa, indicando proximidade entre os valores de ET calculada e ET do modelo, e nos períodos de alta taxa evapotranspirativa, houve maior discrepância dos valores entre as ETs. Ao observar a abordagem gráfica mensal, pode se observar que houve uma maior disparidade entre as ET calculada e ET do modelo para os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, novembro e dezembro. A Tabela 12 expõe os resultados obtidos através da análise descritiva dos dados para a Bacia do São Francisco.

TABELA 12. Análise descritiva de mínima, máxima e média ET para a bacia do São Francisco.

Bacia do São Francisco	
Mínima ET calculada: 4,17 mm/mês	Mínima ET do modelo: 8,90 mm/mês
Máxima ET calculada: 194,77 mm/mês	Máxima ET do modelo: 112,91 mm/mês
Média da ET calculada: 71,71 mm/mês	Média da ET do modelo: 62,05 mm/mês

A tabela demonstra uma diferença média entre a ET calculada e a ET do modelo de 9,66 mm/mês. A diferença entre os valores de mínimo para as ETs foi de 4,73 mm/mês e a diferença entre os valores de máximo de 81,86 mm/mês. Estes números reiteram a diferença existente entre os valores de ET calculada e ET do modelo para os períodos de alta ET. A Figura 29 apresenta o comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, escoamento e precipitação ao longo da série e o comportamento médio ao longo dos meses.

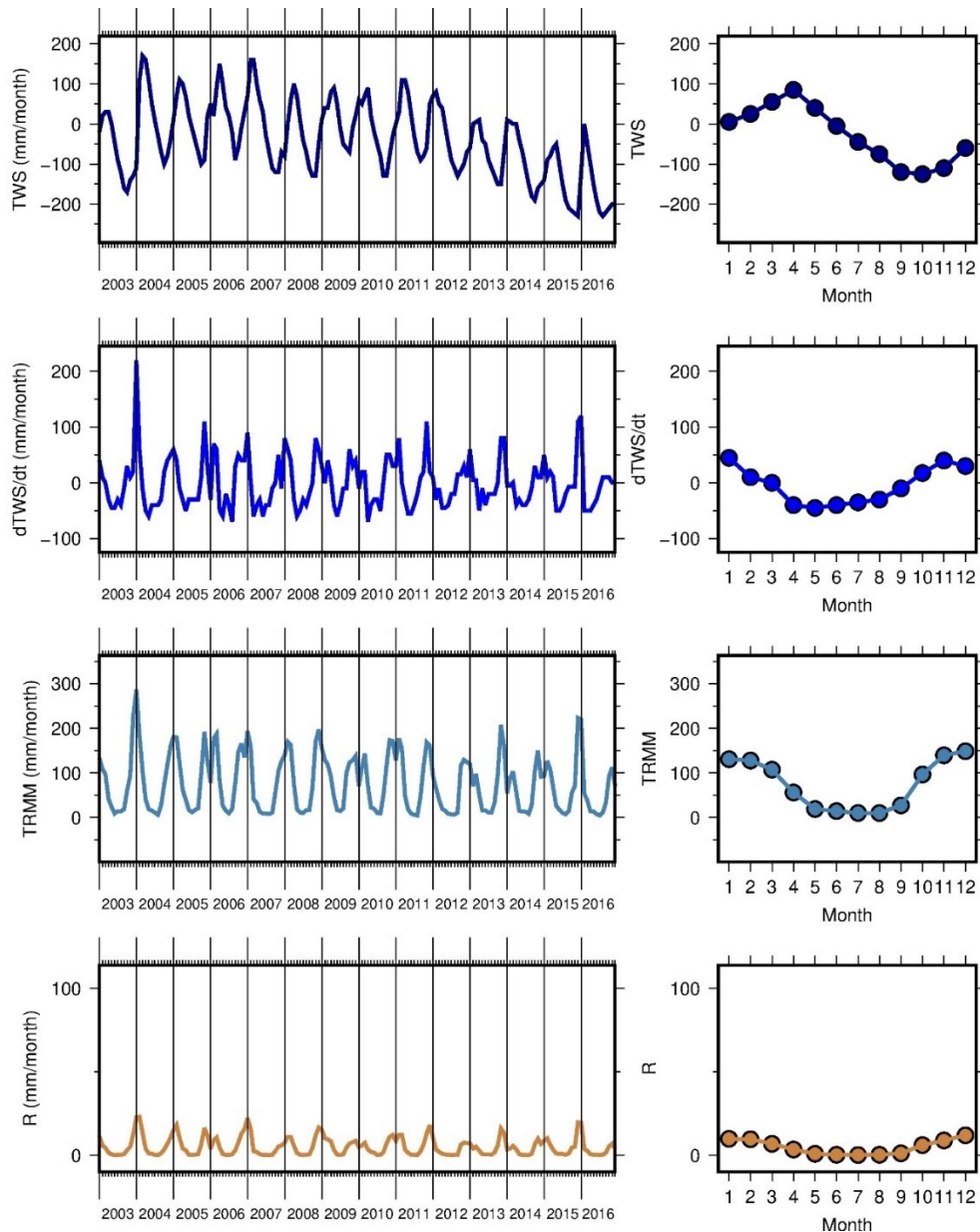


FIGURA 38. Gráfico do comportamento temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, precipitação e escoamento ao longo da série, para a bacia do São Francisco.

A figura demonstra um comportamento próximo entre as variáveis total de água armazenada variando nos intervalos de tempo, precipitação e escoamento. A dinâmica

apresentada pelas variáveis ao longo dos meses se mostra conforme à dinâmica do ciclo hidrológico, com períodos bem definidos de alta e baixa disponibilidade hídrica nos períodos de outubro a março, e abril a setembro, respectivamente.

As Figuras 39 e 40 apresentam o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima para a Bacia do São Francisco, para os meses janeiro e agosto ao longo de toda a série de dados, os quais respectivamente correspondem aos valores de máximo e mínimo da ET média mensal calculada.

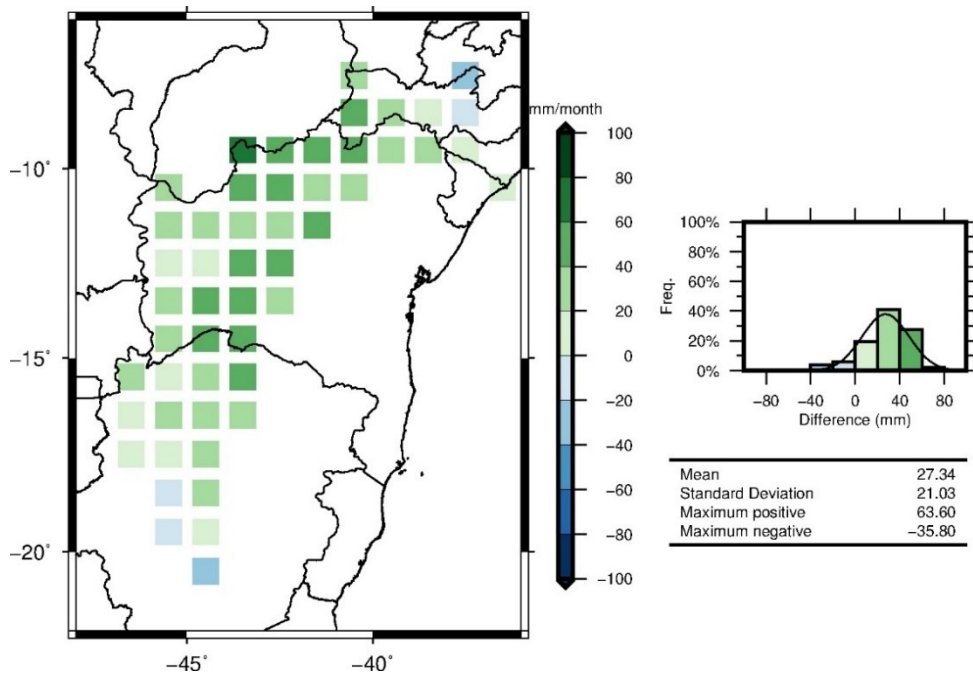


FIGURA 39. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de janeiro para a Bacia do São Francisco.

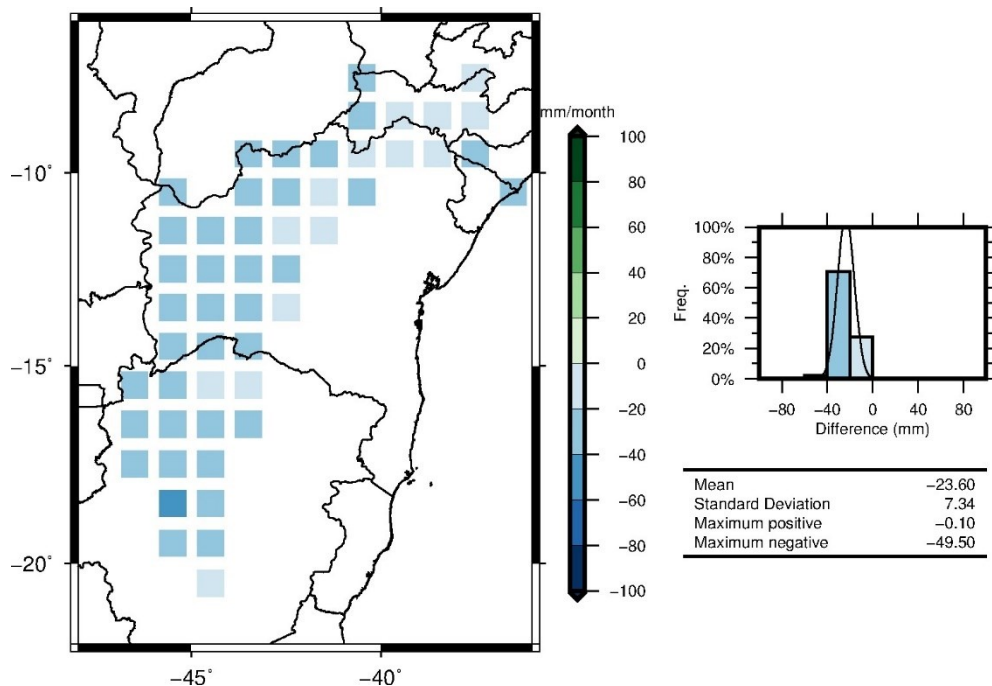


FIGURA 40. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de agosto para a Bacia do São Francisco.

A Figura 41 apresenta a matriz de correlação entre as variáveis Precipitação (TRMM), ET (GLDAS), Escoamento (FLDAS) e dTWS/dt (GRACE), para a Bacia do São Francisco.

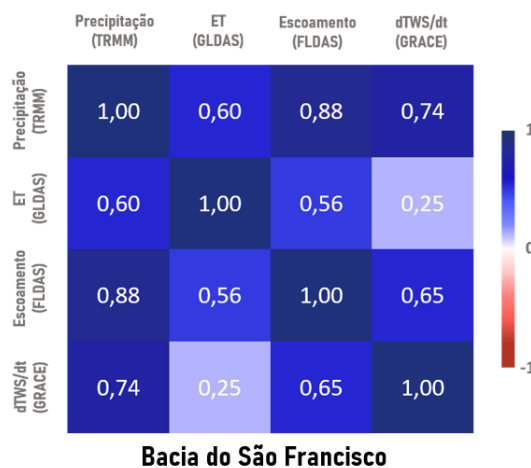


FIGURA 41. Matriz de correlação entre as variáveis precipitação, ET do modelo, escoamento e dTWS/dt, para a Bacia do São Francisco.

A maior correlação existente entre as variáveis em estudo, foi obtida entre as variáveis escoamento e precipitação da Bacia São Francisco. O coeficiente de 0,88, indica forte correlação entre as variáveis. A relação dTWS/dt e ET do modelo indicou baixa correlação, com coeficiente de 0,25.

5.5 Bacia do Tocantins

A Figura 42 apresenta os resultados da análise para a Bacia do Tocantins, revelando como se comportam as variáveis ET calculada e ET do GLDAS ao longo da série de dados, a dinâmica das ETs ao longo dos meses e aponta também o coeficiente de correlação entre a ET calculada e ET do modelo.

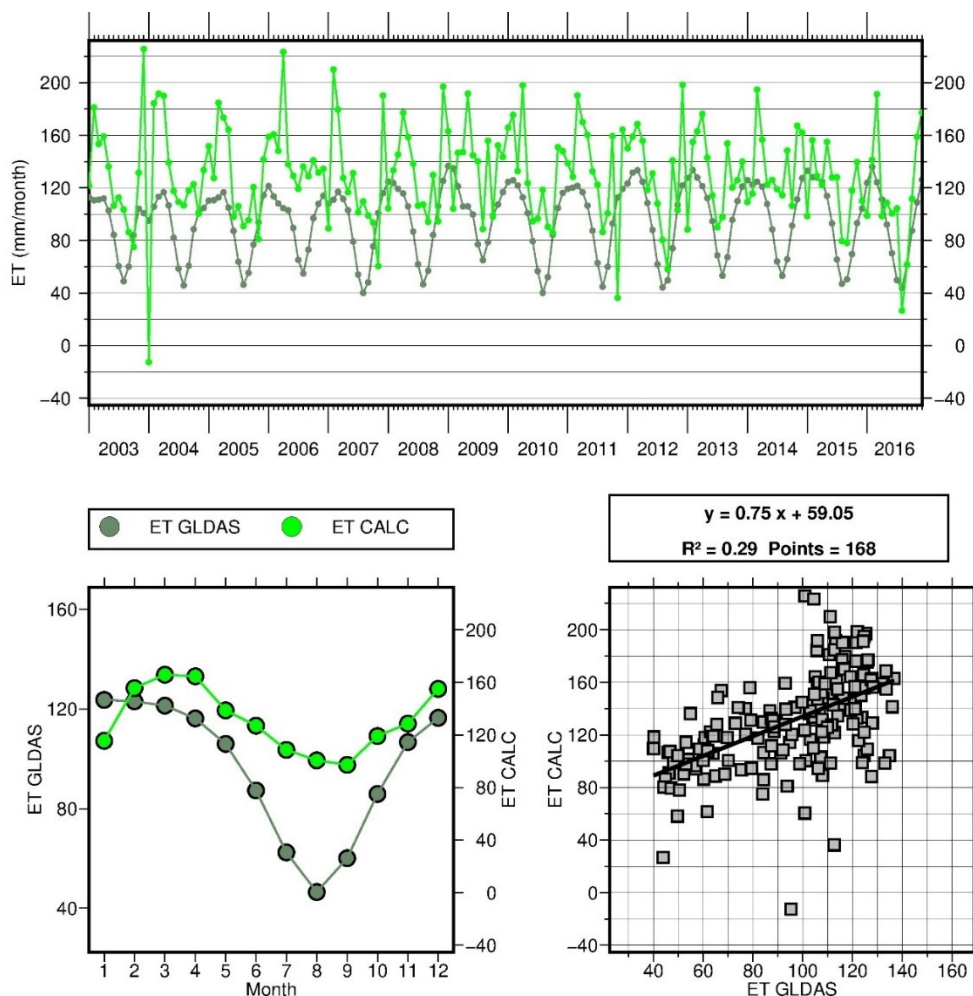


FIGURA 42. Comportamento temporal das variáveis ET calculada e ET nativa do modelo GLDAS ao longo da série temporal de dados, comportamento médio ao longo dos meses e o grau de correlação entre as ETs para a bacia do Tocantins.

É notável a existência de alterações repentinas na série da ET calculada, o que faz com o que o comportamento temporal entre as ETs seja diferente das demais bacias, onde mesmo com grandes discrepâncias entre as ETs, existia uma similaridade entre os comportamentos ao longo da série. A bacia do Tocantins, apresentou diferenças significativas entre as ETs nos períodos de alta e de baixa taxa evapotranspirativa.

Na análise mensal, pode se observar que as maiores diferenças entre a ET calculada e ET do modelo ocorreram nos meses de junho, julho, agosto e setembro. As menores diferenças se deram nos meses de fevereiro, março, novembro e dezembro. A análise apresenta coeficiente de correlação de 0,29, o que indica baixa relação entre as variáveis. A Tabela 13 expõe os resultados obtidos através da análise descritiva dos dados para a Bacia do Tocantins.

TABELA 13. Análise descritiva de mínima, máxima e média ET para a bacia do Tocantins.

Bacia do Tocantins	
Mínima ET calculada: 0 mm/mês	Mínima ET do modelo: 40,11 mm/mês
Máxima ET calculada: 225,69 mm/mês	Máxima ET do modelo: 136,64 mm/mês
Média da ET calculada: 130,49 mm/mês	Média da ET do modelo: 95,60 mm/mês

A diferença entre os valores de mínimo para as ETs foi de 40,11 mm/mês e a diferença entre os valores de máximo de 89,05 mm/mês. A tabela demonstra uma diferença média entre a ET calculada e a ET do modelo de 34,89 mm/mês. Estes números condizem com as demais bacias analisadas, com a existência de alta discrepância entre os valores de ET calculada e ET do modelo para os períodos de alta taxa evapotranspirativa.

A Figura 43 apresenta a dinâmica temporal das variáveis TWS, $dTWS/dt$, escoamento e precipitação ao longo da série e o comportamento médio ao longo dos meses.

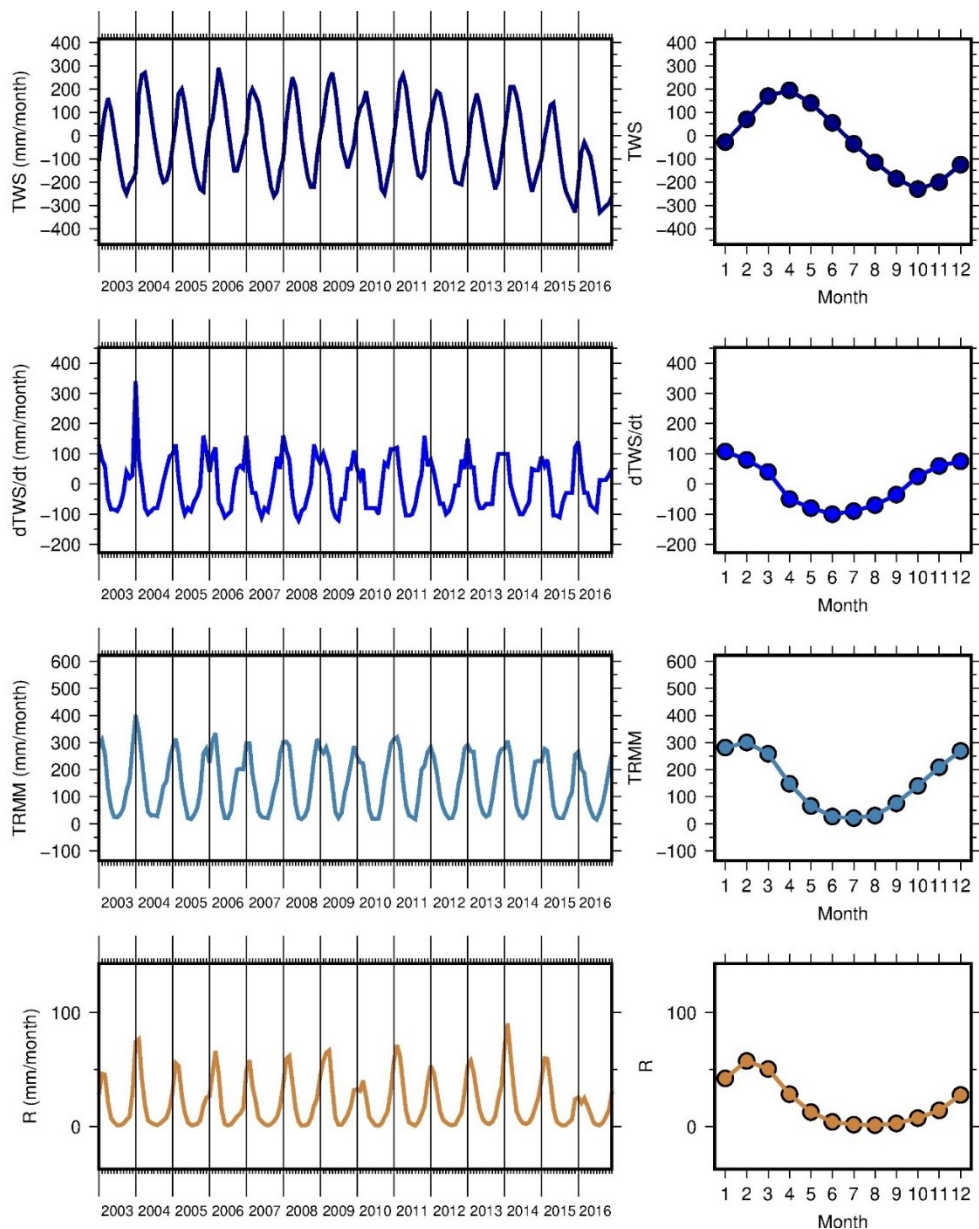


FIGURA 43. Gráfico do comportamento temporal das variáveis TWS, dTWS/dt, precipitação e escoamento ao longo da série, para a bacia do Tocantins.

Os gráficos expõem um comportamento similar entre as variáveis total de água armazenada variando nos intervalos de tempo, precipitação e escoamento. Quando observados os gráficos da dinâmica mensal, as variáveis analisadas apresentaram uma dinâmica semelhante ao longo dos meses, o que reitera a influência direta dessas variáveis no ciclo hidrológico.

As Figuras 44 e 45 apresentam o estudo da diferença pontual obtida entre os valores calculados e valores de referência do modelo para os períodos de máxima e mínima para a Bacia do Tocantins-Araguaia, para os meses janeiro e agosto ao longo de toda a série de dados, os quais respectivamente correspondem aos valores de máximo e mínimo da ET média mensal calculada.

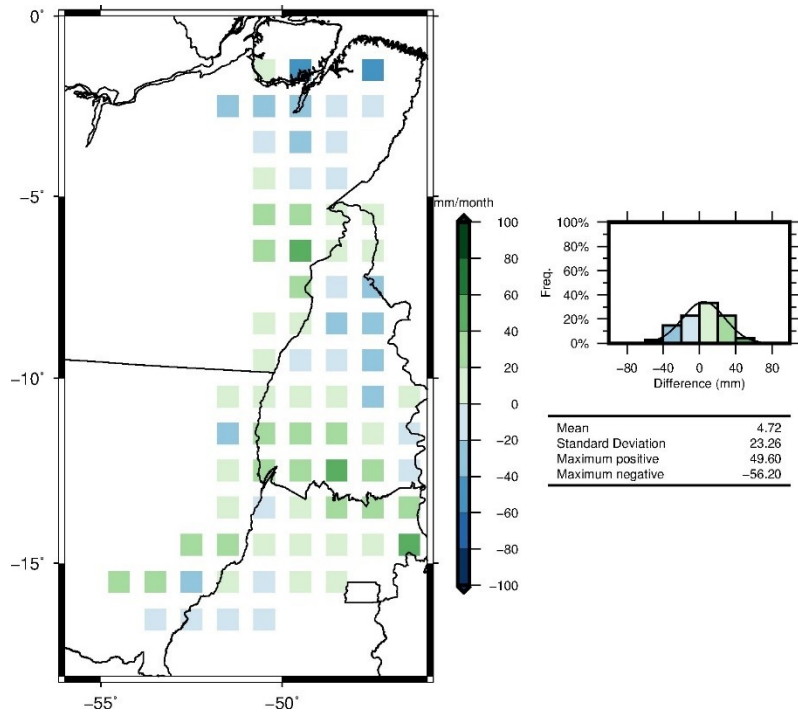


FIGURA 44. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de janeiro para a Bacia do Tocantins.

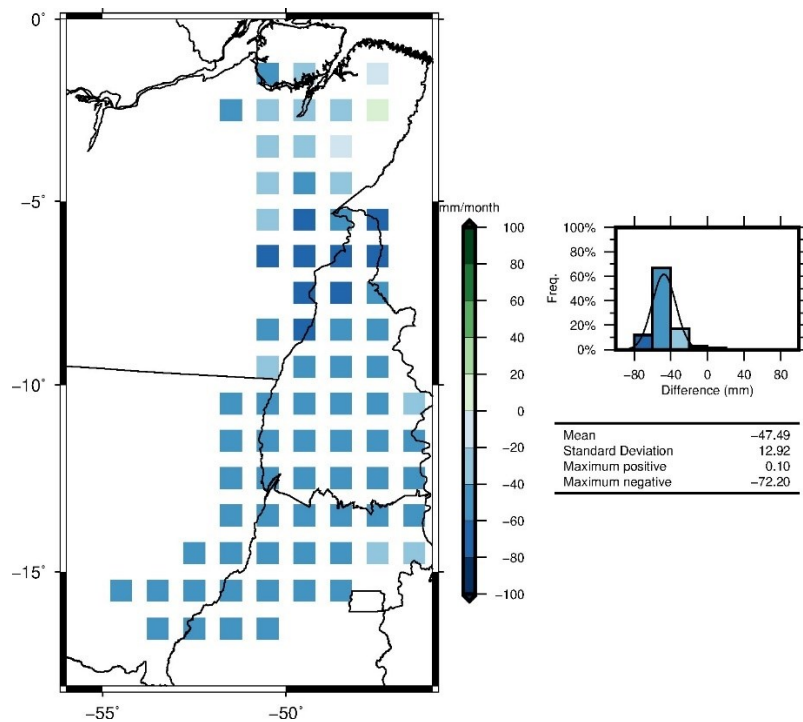


FIGURA 45. Análise da diferença pontual entre a ET calculada e ET do modelo do mês de agosto para a Bacia do Tocantins.

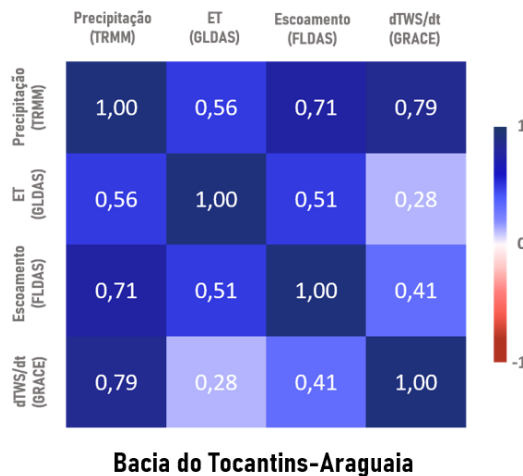


FIGURA 46. Matriz de correlação entre as variáveis precipitação, ET do modelo, escoamento e dTWS/dt, para a Bacia do Tocantins-Araguaia.

Nota-se que para a Bacia do Tocantins-Araguaia, a maior correlação se deu entre as variáveis dTWS/dt e precipitação, assim como na maior parte das demais bacias em estudo. O coeficiente de correlação de 0,79 indica uma alta correlação entre as variáveis. A associação entre as variáveis dTWS/dt e ET do modelo apresentou a menor correlação da bacia, com coeficiente igual a 0,28, o qual aponta baixa correlação.

5.6 Síntese dos Resultados

Através da análise gráfica do Comportamento Temporal das Variáveis ao Longo da Série, é possível compreender que a variação mensal da ET calculada e da ET do modelo exibe a dinâmica anual na disponibilidade de recursos hídricos para cada uma das regiões hidrográficas analisadas, que evidencia a alternância sazonal anual dos intervalos de maiores e menores volumes de precipitação.

Conforme pode ser observado, o semestre definido de outubro ao mês de março caracteriza o período com maior disponibilidade hídrica em todas as bacias que consistem a área de estudo, consequência do maior volume de precipitações, com médias concentradas no mês janeiro para as bacias do Paraná, Paraguai, São Francisco e Tocantins, com médias de 248,20 mm/mês, 244,71 mm/mês, 160,99 mm/mês e 302,27 mm/mês, respectivamente. Para a Bacia Amazônica, o mês de maior média de precipitação durante a série foi março, com média de 318,79 mm/mês, conforme dados de precipitação obtidos através da missão TRMM. Seguindo a mesma linha de investigação, o período de abril a setembro configura o semestre com baixa disponibilidade hídrica, motivada pelo baixo volume de precipitações, com menores

médias concentradas no mês de agosto para as bacias Amazônica, Paraná, São Francisco e Tocantins, com médias de 79,14 mm/mês, 36,52 mm/mês, 8,77 mm/mês e 20,62 mm/mês, na devida ordem. Para a Bacia do Paraguai, a menor média ao longo da série foi registrada para o mês de julho, com média de 23,94 mm/mês. Esta investigação se apresentou coerente quando confrontada com as informações expostas no Relatório de Conjuntura de Recursos Hídricos de 2013 (ANA, 2013), relativas aos regimes pluviométricos sazonais no território nacional.

Quanto as correlações entre as variáveis precipitação, escoamento, ET do modelo e dTWS/dt, as correlações mais significativas se deram entre as variáveis dTWS/dt e precipitação, em sua maioria indicando fortes correlações. As menores correlações ocorreram entre as variáveis dTWS/dt e ET do modelo e entre as variáveis ET do modelo e escoamento, em sua maioria apresentando coeficientes que indicam baixa correlação.

6 CONCLUSÕES

A metodologia empregada, apresentou, no geral, superestimativa dos valores quando comparada às diretrizes de referência. O modelo mostrou-se uma alternativa para avaliação qualitativa e quantitativa da ET em períodos de alta disponibilidade hídrica. A partir das análises realizadas, foi possível identificar discrepâncias mínimas entre a ET calculada e a ET do modelo GLDAS para meses de maior precipitação, sobretudo para as bacias Amazônica, Paraguai e Tocantins.

A partir da análise por diferença pontual para os períodos de máxima e mínima ET, foi possível observar variações significativas entre a ET calculada e a ET do GLDAS nos períodos de baixa disponibilidade hídrica, o que conseqüentemente impacta na taxa evapotransporativa.

Sobre o uso do GRACE, destaca-se a facilidade na obtenção dos dados e sua capacidade de recobrimento para grandes áreas, ideal para estudos que abrangem grandes regiões hidrográficas. Ao tratar sobre as desvantagens, faz-se necessária a colocação no que diz respeito a série temporal. A missão iniciou-se em 2002, o que faz com que a série temporal de dados seja pequena, o que não é ideal para estudos hidrológicos. A resolução espacial não é recomendada para estudos que abrangem pequenas regiões hidrográficas. Outra desvantagem se faz na ausência de dados durante a série, intensificadas após o ano de 2011, visto que a vida útil prevista dos satélites era de 5 anos, antes do lançamento.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a aplicação desta metodologia para as as bacias hidrográficas que não foram trabalhadas neste estudo, que são as bacias: Atlântico Leste, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Sudeste, Atlântico Sul, Parnaíba e Uruguai. Tal aplicação proverá uma base de informações em nível de resultados e discussões com maior nível de detalhamento, o que conseqüentemente possibilitará uma análise mais assertiva quanto à eficiência da metodologia utilizada.

Indica-se também a evolução do estudo quanto à apuração das incertezas vinculadas aos modelos de estimativa da ET (GLDAS), precipitação (TRMM), escoamento (FLDAS) e o $dTWS/dt$ (GRACE), assim como apresentado em Long et al. (2014) e Oliveira et al. (2014). Da mesma forma, recomenda-se avaliar a utilização de novas fontes de dados para as variáveis precipitação e escoamento, além da utilização de outros modelos que forneçam a estimativa de ET, com o objetivo de validar a metodologia, comparando com os resultados apresentados neste trabalho. Ferramentas como o GLDAS precipitation, GRACE-FO, ERA-5, por exemplo, surgem como potenciais mecanismos de aquisição de dados para as variáveis precipitação, TWS e escoamento. Por se tratar de modelos e variáveis que possuem um grande dinamismo,

a obtenção de resultados satisfatórios nem sempre é alcançada, visto que o desempenho de cada modelo varia de acordo com as condições específicas de cada região, como pode ser visto em Lehmann et al. (2021), que apresenta uma série de análises de desempenho de modelos utilizados em um estudo hídrico em escala global, utilizando observações nativas do sensoriamento remoto e reanálises.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. A. M.; CAVALCANTE, I. N.; MATTA, M. A. S. *O sistema aquífero grande Amazônia – SAGA: um imenso potencial de água subterrânea no Brasil*. 2013. Acesso em: 05 jun. 2021.
- AGHAKOUCHAK, A.; FARAHMAND, A.; MELTON, F. S.; TEIXEIRA, J.; ANDERSON, M. C.; WARDLOW, B. D.; HAIN, C. R. *Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities*. 2015. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 452–480. Acesso em: 10 dez. 2020. DOI:10.1002/2014rg000456.
- ALLEN, R. G.; TASUMI, M.; MORSE, A.; TREZZA, R.; WRIGHT, J. L.; BASTIAANSEN, W.; KRAMBER, W.; LORITE, I.; ROBISON, C. W. *Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC) – Applications*. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. v. 133, n. 4, p. 395-406, ago. 2007. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(395\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(395))
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2009**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2009_rel.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2010**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2010_inf.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2011**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2011_inf.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2012**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2012_inf.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2013**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2013_rel.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2014**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informes2014.pdf>>. Acesso em: 07 jul. 2021.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2015**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <

https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_2015.pdf>. Acesso em: 07 jul. 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2016**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/informe-conjuntura-2016.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2021.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos de 2017**. Brasília, DF: ANA. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel-1.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2021.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Estudos Hidrogeológicos na Bacia Hidrográfica do São Francisco - Sistema Aquífero Urucua/Areado e Sistema Aquífero Bambuí**. 2013. Acesso em: 12 dez. 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **HidroWeb**. 2016a. Disponível em: <<http://goo.gl/dVwrUd>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH)**. 2018. Disponível em: <<https://www.snirh.gov.br>>. Acesso em: 12 dez. 2020.

ANDERSON, M.C.; ZOLIN, C.A.; SENTELHAS, P.C.; HAIN, C.R.; SEMMENS, K.; YLMAZ, M.T.; TETRAULT, R. 2016. *The Evaporative Stress Index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts. Remote Sensing of Environment*, 174, 82-99. Acesso em: 15 jan.2020.

ANTAQ. **Bacia do Tocantins-Araguaia: Plano Nacional de Integração Hidroviária**. Universidade Federal de Santa Catarina. Fevereiro, 2013. Disponível em: <<http://web.antaq.gov.br/portaltv3/PNIH/RTBaciaTocantinsAraguaia.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2020.

ASNER, G. P.; MARTIN, R. E.; MASCARO, J. *Coral reef atoll assessment in the South China Sea using Planet Dove satellites*. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 2017, 3, 57–65. Acesso em: 15 dez. 2020.

BASTIAANSEN, W. G. M. *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*. 1995. 273 f. Doctoral thesis – Wageningen Agricultural University, Wageningen The Netherlands, 1995.

BASTIAANSEN, W. G. M; MENENTI, M.; FEDDES, R. A., HOLTSLAG, A. A. M. *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) – 1. Formulation*. *Journal of Hydrology*, v. 212, p. 198–212, dez. 1998a. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4) 74.

BASTIAANSEN, W. G. M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MA, Y.; MORENO, J. F.; ROERINK, G. J.; VAN DER WAL, T. *A remote sensing surface energy balance algorithm*

for land (SEBAL) – 2 Validation. Journal of Hydrology, v. 212, p. 213–229, dez. 1998b. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6).

BATISTELLA, M.; ARTAXO, P.; NOBRE, C.; BUSTAMANTE, M.; LUIZAO, F.; 2009. **Results from LBA and a vision for future amazonian research**. Amazonia and *Global Change*. Amer Geophysical Union, 2000 Florida Ave Nw, Washington, Dc 2009 USA. Acesso em: 10 dez. 2020.

BLANCO, R. A. **Água, ouro do terceiro milênio**. Revista eletrônica. 1999. Disponível em: <<http://www.jardimdeflores.com.br/ECOLOGIA/agua.html>>. Acesso em: 01 fev. 2020.

BOS, M. G.; BURTON, M. A. S.; MOLDEN, D. J. *Irrigation and drainage performance assessment : practical guidelines*. 2005. CABI Pub. 158 p.

BRADLEY, B. A.; JACOB, R. W.; HERMANCE, J. F.; MUSTARD, J. F. *A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data*. *Remote Sensing of Environment*, 106(2), 137–145, 2007. DOI:10.1016/j.rse.2006.08.002.

CALZOLAIO, D.; CURRELI, F.; DUNCAN, J.; MOORHOUSE, A.; PEREZ, G.; VOEGT, S. **EDRS-C – The second node of the European Data Relay System is in orbit**. *Acta Astronautica*, 177, 537–544, 2020. Acesso em: 10 dez. 2020. DOI:10.1016/j.actaastro.2020.07.043.

CAMPOS, H. C. N. S. **Águas Subterrâneas na Bacia do Paraná**. Geosul (UFSC), Florianópolis, v. 19, n.37, p. 47-65, 2004. Acesso em: 05 jul. 2021.

CARVALHO, J.C.; SALES, M.M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J.A.; MOTTA, N.O.; FRANCISCO, R.R. **Processos Erosivos**. 2006. In: *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. J.C. Carvalho, M.M. Sales, N.M. Souza e M.T.S. Melo. Editora FINATEC, Brasília, p.39-91.

CASTRO JÚNIOR, C. A. C. **Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas**. 2018. 234 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Acesso em: 05 jul. 2021.

CBHSF – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco 2016-2025**. Belo Horizonte: CBHSF, 2016. Acesso em: 10 abr. 2021.

CHANG, H. K.; SILVA, F. DE P. E. **Contribuição ao arcabouço geológico do Sistema Aquífero Urucuia**. *Geociências*, v. 34, n. 4, p. 872–882, 2015. Acesso em: 12 dez. 2020.

CNRH. **Resolução n. 32, de 15 de outubro de 2003**. Anexo I. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, 2003.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos. Safra 2020/21 - 3º Levantamento**. Brasília, DF, v. 8, n.3, 2020. Acesso em: 12 dez. 2020.

CPRM. Relatório Anual 2008. Serviço Geológico do Brasil. 2008. 3-4 dez. Rio de Janeiro. Memória. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. 1 CD-ROM. Acesso em: 04/05/2021.

DALL'AGNOL, A. **Ministério da Agricultura prevê crescimento de 27% na produção de grãos em 10 anos.** 2020. Disponível em: <https://www.canalrural.com.br/noticias/ministerio-da-agricultura-preve-crescimento-de-27-na-producao-de-graos-em-10-anos/>. Acesso em: 20 nov. 2020.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **MATOPIBA GeoWeb.** 2015. Environmental Systems Research Institute – ESRI. IDW – ArcMap 10.3. 2016. Disponível em: <http://goo.gl/gxk4E2>>. Acesso em: 04/06/2020.

ESPOSITO, M.; CONTICELLO, S.; PASTENA, M.; DOMÍNGUEZ, B. C. ***In-orbit demonstration of artificial intelligence Applied to hyperspectral and thermal sensing from space. In CubeSats and SmallSats for Remote Sensing III; International Society for Optics and Photonics: San Diego, CA, USA, 2019; Volume 11131, p.***

FAO. ***Climate Change and Food Security: A Framework Document Rome. Food and Agriculture Organization of the United Nations;*** 2008. Acesso em: 01 dez. 2020.

FENSTERSEIFER, C. A. **Qualidade das estimativas de precipitações derivadas de satélites na bacia do Alto Jacuí - RS.** Santa Maria, RS, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

FOUNTAS, S.; GARCIAS, E.B.; KASIMATI, A.; DARRA, N. "***The Future of Digital Agriculture: Technologies and Opportunities,***" in IT Professional, vol. 22, no. 1, pp. 24-28, 1 Jan.-Feb. 2020. Acesso em: 25 nov. 2020. DOI: 10.1109/MITP.2019.2963412.

GEBREMICHAEL, M.; HOSSAIN, F. ***Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology.*** Springer, 2010, 327 pp. Acesso em: 10 dez. 2020. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/kr7137/>.

GETIRANA, A. C. V. ***Extreme water deficit in Brazil detected from space. Journal of Hydrometeorology.*** 2016. V. 17(2), 591–599. DOI: <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>.

GIUFFRIDA, G.; DIANA, L.; GIOIA, F.; BENELLI, G.; MEONI, G.; DONATI, M.; FANUCCI, L. ***CloudScout: A deep neural network for on-board cloud detection on hyperspectral images.*** 2020. *Remote Sensing*, 12(14). DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12142.205>.

HOUBORG, R.; RODELL, M.; LI, B.; REICHLER, R.; ZAITCHIK, B. F. ***Drought indicators based on model-assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) terrestrial water storage observations.*** 2012. *Water Resources Research*, 48(7). Acesso em: 05 mai. 2021. DOI:10.1029/2011wr011291.

HUALAN, R.; BEAUDOING, H.K.; TENG, W.L.; VOLLMER, B.; RODELL, M. ***NASA GLDAS Evapotranspiration Data and Climatology.*** GES DISC-NASA, 2012. Acesso em: 10 dez. 2020.

HUFFMAN, G. J.; ADLER, R. F.; BOLVIN, D. T.; GU, G.; NELKIN, E. J.; BOWMAN, K. P.; HONG, Y.; STOCKER, E. F.; WOLFF, D. B. *The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales*. *Journal of Hydrometeorology*, v. 8, p. 38-55, 2007. Acesso em: 19 dez.2020.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Estatística da Produção Agrícola, 2021**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/home/lspa/brasil>. Acesso em: 12 dez. 2020.

INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. de C. **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 21-33. Acesso em: 17 dez. 2020.

INPE. **HISTÓRIA: A origem do INPE na corrida espacial**. [S. l.], 4 dez. 2017. Disponível em: http://www.inpe.br/institucional/sobre_inpe/historia.php. Acesso em: 20 dez. 2020.

JARMAN, M., et al. “*Satellite for Agriculture*”. *Agriculture and Horticulture Development Board*, 2018. Acesso em: 20 dez. 2020.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied multivariate statistical analysis*. 6ª. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2007. Acesso em: 04 jul. 2020.

JUNG, H.C.; GETIRANA, A.; POLICELLI, F.; MCNALLY, A.; ARSENAULT, K.; KRISTI, R. KUMAR, S. *Upper Blue Nile Basin Water Budget from a Multi-Model Perspective*. *Journal of Hydrology*, 2017. S0022169417307151. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.040.

KUMAR, S.; KEVIN, B. *The evolution of global positioning system (GPS) technology*. *Journal of Science Education and Technology* 11 (1), 59–80, 2002. Acesso em: 20 dez. 2020.

KUMMEROW, C.; SIMPSON, J.; THIELE, O.; BARNES, W.; CHANG, A. T. C.; STOCKER, E. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in orbit. *Journal of Applied Meteorology*. 2000. 39(12): 1965-1982. DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/1520-0450>.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. *Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces*. *Hydrological Sciences Journal* 41: 495-516, 1996. Acesso em: 20 dez. 2020

LANDERER, F. TELLUS_GRAC_L3_JPL_RL06_LND_v03. Ver. RL06 v03. PO.DAAC, CA, USA, 2020. Acesso em: 10 dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5067/TELND-3AJ63>

LEHMANN, F.; VISHWAKARMA, B. D.; BAMBER, J. *Closing the water budget at the global scale using observations, remote sensing, and reanalyses*. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-10270. DOI: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10270>, 2021.

LEVIZZANI, V.; KIDD, C.; KIRSCHBAUM, D. B.; KUMMEROW, C. D.; NAKAMURA, K.; TURK, F. J. *Satellite precipitation measurement. Volume 1*. 2020. Springer.

LONG, D.; SCANLON, B. R.; LONGUEVERGNE, L.; SUN, A. Y.; FERNANDO, D. N.; SAVE, H. *GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. 2013. Geophysical Research Letters, 40(13), 3395–3401.* Acesso em 20 dez. 2020. DOI:10.1002/grl.50655.

LONG, D.; LONGUEVERGNE, L.; SCANLON, B. R. Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites, 2014. *Water Resour. Res.*, 50, 1131– 1151. DOI:10.1002/2013WR014581.

KUMAR, S.; KEVIN, B. *The evolution of global positioning system (GPS) technology. Journal of Science Education and Technology* 11 (1), 59–80, 2002. Acesso em: 20 dez. 2020.

KUSTAS, W.P.; NORMAN, J.M. *Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. Hydrological Sciences Journal* 41: 495-516, 1996. Acesso em: 20 dez. 2020

MARTINS, A. P. **Uso de dados do sensor Modis/Água e do algoritmo Sebal para estimativa da evapotranspiração real na bacia do Rio Paranaíba.** 2015. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. Acesso em: 20 dez. 2020.

MATTA, M. A. DA S. 2000. **Águas superficiais e subterrâneas da bacia Tocantins Araguaia como subsídio para um estudo de impacto ambiental.** Águas Subterrâneas. Acesso em: 06 jul. 2021.

MC NALLY, A.; ARSENAULT, K.; KUMAR, S.; SHUKLA, S.; PETERSON, P.; WANG, S.; FUNK, C.; PETERS LIDARD, C.D.; VERDIM, J.P *A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. Sci.*, 2017. Acesso em: 10 dez. 2020.

MC NALLY, A. NASA/GSFC/HSL. *FLDAS Noah Land Surface Model L4 Global Monthly 0.1 x 0.1 degree (MERRA-2 and CHIRPS), Greenbelt, MD, USA, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2018.* Acesso em: 10 dez. 2020. DOI: 10.5067/5NHC22T9375G.

MEZADRE, P. F.; ÁLVARES, C.; CAMPOS NETO, S.; PEPINO DE PAULA, J. M. **Hidrovias no Brasil: Perspectiva Histórica, Custos e Institucionalidade.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. 2014. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br>. Acesso em: 05 jun. 2021.

MILANI, E.J.; FRANÇA, A.B.; SCHNEIDER, R.L. **Bacia do Paraná.** Boletim de Geociências da Petrobrás, v. 8, n. 1, p. 69-82, 1994. Acesso em 10 dez. 2020.

MIRANDA, E. E. de; MAGALHÃES, L. A.; CARVALHO, C. A. de. **Proposta de delimitação territorial do MATOPIBA.** Campinas: Embrapa GITE, 2014. Acesso em: 15 dez. 2020.

MOLDEN, D. *Water responses to urbanization. Paddy and Water Environment (Special Issue Water Transfers).* 2007. 5 (4), 207–209. Acesso em: 01 dez. 2020. DOI:

10.1007/s10333-007-0084-8.

MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R.; COLACO, A. F. **Agricultura de precisão**. [S.l: s.n.], 2015. Acesso em: 20 dez. 2020. MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**, 2. ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p. Acesso em: 02 jan. 2020.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2008. 476p.

MONTECINO, H.C.; STAUB, G.; FERREIRA, V.G.; PARRA, L.B. **Monitoring Groundwater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data Simulation**. Boletim de Ciências Geodésicas. 2016. v. 22 (nº1): p. 1-15. Acesso em: 05 jul. 2021.

MOREIRA, L. C. J. Variabilidade local e regional da evapotranspiração estimada pelo algoritmo SEBAL. In: **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v30, n06, Nov/dez 2010. P.1148-1159. Acesso em: 10 dez. 2020.

MOTTA, E. J. de O.; GONÇALVES, N. E. W. **Plano Nascente Paraguai: plano de preservação e recuperação de nascentes da bacia do rio Paraguai**. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Paraguai (Codevasf) / Editora IABS, Brasília-DF, Brasil - 2016. Acesso em: 06 jun. 2021.

NAGEL, G. W.; NOVO, E. M. L. M.; KAMPEL, M. **Nanosatellites applied to optical Earth observation: a review**. Rev. Ambient. Água, Taubaté, v. 15, n. 3, e2513, 2020. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2020000300310&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 09 mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2513>.

NEALE, C. **Evapotranspiration Estimates at Different Scales Using Remote Sensing. Daugherty Water for Food Global Institute**. MOISST Workshop, 2018. Acesso em: 09 mar. 2021.

OLIVEIRA, P. T. S., M. A. NEARING, M. S. MORAN, D. C. GOODRICH, E. WENDLAND, H. V. 2014. **Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado**, *Water Resour. Res.*, 50, 7100–7114. Acesso em: 05 jul. 2021. DOI:10.1002/2013WR015202.

OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H.V. **Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado**. *Water Resour.* 2014. Res.,50, 7100–7114. DOI:10.1002/2013WR015202.

PLANET. **Planet Imagery: Product Specifications**. San Francisco, Ca: Planet, 2018a. 57 p. Acesso em: 15 abr. 2020.

RAMILIEN, G.; FRAPPART, F.; CAZENAVE, A.; GUNTER, A. **Time variations of the land water storage from an inversion of 2 years of GRACE geoids**, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 235, 283 – 301, 2005a. Acesso em: 10 dez. 2020.

RODELL, M.; HOUSER, P. R.; JAMBOR, U.; GOTTSCHALCK, J.; MITCHELL, K.; MENG, C. J.; ARSENAULT, K.; COSGROVE, B.; RADAKOVICH, J.; BOSILOVICH, M.; ENTIN, J. K.; WALKER, J. P.; LOHMANN, D.; TOLL, D. *The global land data assimilation system*. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 85, n. 3, p. 381-394, 2004. Acesso em: 10 dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.

ROSENHAIM, T. L.; GONÇALVES, R. M.; LIMA, J. P.; GAMA, N. A. **Comportamento do armazenamento de água entre os anos de 2002 a 2015 para a região hidrográfica brasileira do atlântico nordeste oriental considerando observações GRACE, TRMM e in situ**. *Geociencias*, v. 37, p. 823-834, 2018. Acesso em: 30 dez. 2020.

ROSENHAIM, T. L. **Observações da missão Grace aplicadas ao monitoramento do armazenamento d'água na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Acesso em: 15 dez. 2020.

SCANLON, B. R.; ZHANG, Z.; REEDY, R.C.; POOL, D. R.; SAVE, H.; LONG, D.; CHEN, J.; WOLOCK, D. M.; CONWAY, B. D.; WINESTER, D. *Hydrologic implications of GRACE satellite data in the Colorado River Basin, Water Resource*. 2015. Res., 51, 9891–9903. Acesso em: 15 dez. 2020. DOI:10.1002/2015WR018090.

SHIRATSUCHI, L. S.; BRANDAO, Z. N.; VICENTE, L. E.; VICTORIA, D. C.; DUCATI, J. R.; OLIVEIRA, R. P.; VILELA, M. F. **Sensoriamento Remoto: conceitos básicos e aplicações na Agricultura de Precisão**. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). *Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar*. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 58-73.

SIEBERT, S.; DÖLL, P. *Quantifying blue and green virtual water content in global crop production as well as potential production losses without irrigation*. *Journal of Hydrology*, 2010. Acesso em: 12 dez. 2020. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.07.031.

SILVEIRA, H. R. O.; SANTOS, M. O.; SILVA, V. A.; VOLPATO, M. M. L.; ALVES, H. M. R.; DANTAS, M. F.; BARBOSA, J. P. R. A. D.; CARVALHO, G. R.; **Relações entre índices de reflectância foliares e potencial hídrico de cafeeiro irrigado e de sequeiro**. In: *Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, IX, 2015, Curitiba. Anais...Curitiba: Consórcio Pesquisa Café, 2015*. Acesso em: 20 dez. 2020.

STOCKER, T. F., et al. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Cambridge Univ. Press)*, 2013. Acesso em: 20 dez. 2020.

TANG, G.; MA, Y.; LONG, D.; ZHONG, L.; HONG, Y. (2016). *Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales*. *Journal of Hydrology*, 533, 152-167. Acesso em: 01 dez. 2020.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; REIGBER, C. *The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results*. 2004. 31(9), 0–0. Acesso em: 01 dez. 2020. DOI:10.1029/2004gl019920.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e**

de água no Semiárido brasileiro. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32p. 2013a.

TEIXEIRA, S. **Ciclo Hidrológico: como explicar esse conceito**. Cursos CPT. 2019. Disponível em: <https://www.cpt.com.br/cursos-meioambiente/artigos/ciclo-hidrologico-como-explicar-esse-conceito>. Acesso em: 05 mai. 2020.

TIAN, Y.; PETERS-LIDARD, C. D. *A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements*. 2010. *Geophysical Research Letters*. 37(24). Acesso em: 06 jun. 2021. DOI:10.1029/2010gl046008.

TUNDISI, J.G. Limnologia do século XXI: perspectivas e desafios. São Carlos: **Suprema Gráfica e Editora**, IIE, 1999. 24 p. Acesso em: 01 dez. 2020.

UNIDATA. *Unidata Community Equipment Awards*. Boulder, CO: UCAR/Unidata, 2017. Acesso em: 10 dez. 2020. DOI: (<https://doi.org/10.5065/D6R49PJ0>).

VASCONCELOS, M. B.; da LUZ, C. A.; MOURÃO, M. A. A. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico Aquífero Serra Grande, Bacia Sedimentar do Paraguai**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2012. Acesso em: 05 jul. 2021.

VERDIN, J.; KLAVER, R. *Grid-cell-based crop water accounting for the famine early warning system*. 2002. 16(8), 1617–1630. Acesso em: 20 dez. 2020. DOI:10.1002/hyp.1025.

WAHR, J.; MOLENAAR, M.; BRYAN, F. *Time variability of the Earth's gravity field: hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE*. 1998. *J Geophys Res Solid Earth* 103(B12):30205–30229

WESSEL, P.; LUIS, J.F.; UIEDA, L.; SCHARRO, R.; WOBBE, F.; SMITH, W.H.F.; TIAN, D. **GMT 6: The Generic Mapping Tools version 6**. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2020, 5556–5564. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.

ZHANG, Y.; PEÑA-ARANCIBIA, J. L.; MCVICAR, T. R.; CHIEW, F. H. S.; VAZE, J.; LIU, C.; LU, X.; ZHENG, H.; WANG, Y.; LIU, Y. Y.; MIRALLES, D. G.; PAN, M. Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. *Scientific Reports*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep19124>.

ZHANG, Z.; CHAO, B.F.; CHEN, J.; WILSON, C.R. *Terrestrial water storage anomalies of Yangtze River Basin droughts observed by GRACE and connections with ENSO*. *Global and Planetary Change*, 126, 35–45, 2016. Acesso em: 25 nov. 2020. DOI:10.1016/j.gloplacha.2015.01.002.