



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

VÂNIA DOS SANTOS FRANCO SODRÉ

**IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS ATUAIS E DE MUDANÇAS FUTURAS NA
HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO TAPAJÓS NA AMAZÔNIA**

BELÉM - PA

2023

VÂNIA DOS SANTOS FRANCO SODRÉ

**IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS ATUAIS E DE MUDANÇAS FUTURAS NA
HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO TAPAJÓS NA AMAZÔNIA**

Tese de Doutorado submetida como requisito à aprovação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências para a obtenção de grau de Mestre ou Doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientadora: Dra. Aline Maria Meiguins de Lima

Coorientador: Dr. Everaldo Barreiros de Souza

BELÉM - PA

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com
ISBDSistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

- S679 Sodré, Vânia dos Santos Franco.
Impactos socioambientais atuais e de mudanças futuras na
hidroclimatologia da bacia do rio Tapajós na Amazônia / Vânia
dos Santos Franco Sodré. — 2023.
136 f.: il. color.
- Orientador(a): Prof^ª. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima
Coorientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Belém, 2023.
1. Desmatamento. 2. Usos da água. 3. Clima. 4.
Hidroclimatologia futura. 5. Tapajós. I. Título.

CDD 551.57

VÂNIA DOS SANTOS FRANCO SODRÉ

**IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS ATUAIS E DE MUDANÇAS FUTURAS
NA HIDROCLIMATOLOGIA DA BACIA DO RIO TAPAJÓS NA
AMAZÔNIA**

Tese de Doutorado submetida como requisito à aprovação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com o Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA Amazônia Oriental como requisito parcial para a obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação clima, sociedade e ambiente

Belém, 09 de junho de 2023

Banca Examinadora:



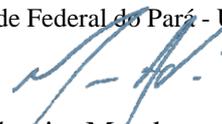
Prof^a. Aline Maria Meiguins de Lima – Orientadora
Doutora em Desenvolvimento Socioambiental
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Alan Cavalcanti da Cunha- Membro externo
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Federal do Amapá – UNIFAP



Prof^a. Marcia Aparecida da Silva Pimentel – Membro interno
Doutora em Geografia
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Marcos Adami – Membro externo
Doutor em Sensoriamento Remoto
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE



Prof. Renato Oliveira da Silva Junior - Membro externo
Doutor em Ciências Ambientais
Instituto Tecnológico Vale - ITV

*À Família e amigos, maiores tesouros depois
do amor de Deus!*

AGRADECIMENTOS

Acredito que na vida, se não tivermos saúde, fé e o amor de Deus não chegamos em lugar algum, por isso o meu agradecimento ao Pai todo poderoso por me proporcionar todos os dias esses três elementos essenciais para conseguir chegar até o final desse objetivo.

Agradeço à Universidade Federal do Pará, esta instituição grandiosa (não somente por sua extensão territorial, mas pela quantidade de profissionais que devolve à sociedade) que me acolheu desde a graduação até agora e que me proporcionou sentimentos variados, sendo o principal o orgulho por ter minha formação completa nela.

Ao Instituto Tecnológico Vale por me proporcionar bolsa de estudo antes e durante essa fase da minha vida. Em especial aos amigos que me acolheram com muito carinho: Cláudia Costa, Douglas Ferreira, Elaine Barreto, Diogo Santos, Juarez Ventura, Giordani Sodré, Renata Tedeschi, dona Eunice, Fátima e outros.

Agradeço imensamente aos meus queridos orientadores Prof^a. Aline Meiguins e Prof. Everaldo de Souza, por estarem sempre disponíveis e presentes em me ajudar nos momentos em que precisei de um norte. Além disso, agradeço ainda à Prof^a. Aline por acreditar no meu potencial e por ouvir minhas lamentações rsrsr, e ao Prof. Everaldo por me dar apoio em minhas deficiências e pelas conversas informais e momentos de descontração que sempre tínhamos! E a ambos pelas orientações no ramo profissional.

Depois da presença de Deus em minha vida, agradeço imensamente a presença da minha querida e amada mãe, Arleth Franco, por todo amor, carinho e ajuda na vida familiar para que eu pudesse ter um pouco mais de tempo para me dedicar ao trabalho e ao estudo. Te amo muito mãe!

Ao meu esposo Edson Sodré e filha Sofya Sodré pelo amor a mim dedicado e por sempre me acolherem depois dos dias de cansaço e pelos momentos de descontração, tão necessários para reporem as minhas energias para continuar.

Aos meus queridos amigos que foram incansáveis em me ajudar quando precisei: Maurício Moura, Rodrigo Rafael, Giordani Sodré, Diogo Santos, Reinaldo Ribeiro e aos demais por todo carinho e companheirismo Ilale Lima, Júlio, Nedilson e Rafaela.

A todos da turma maravilhosa de doutorado 2019: Thaiane Dias, Waléria Monteiro, Davison, Nívia, Lívia, Márcio, Simone, Felipe, Marcelo, Cássio, Paulo, Leoni, Fabiana, Guilherme, Yasmin e Ronaldo pelos momentos “tensos” mas também maravilhosos compartilhados no período das disciplinas e ao longo desses quatro anos. Amo todos vocês!

Ao Instituto de Geociências, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) e à Faculdade de Meteorologia (FAMET) em especial aos laboratórios LEMHA e LABSIN por me concederem a infraestrutura necessária todas as vezes que precisei estar na universidade.

Agradeço também à banca pelas valiosas contribuições para a melhora desta pesquisa.

“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

Albert Einstein

RESUMO

A intensificação do uso e cobertura do solo vem aumentando os problemas ambientais e climáticos nas sub-bacias amazônicas, especialmente na bacia do rio Tapajós que tem importância, não somente para o regional, mas para todo o país quanto a questão econômica e socioambiental. Esta pesquisa avaliou a crescente pressão imposta à bacia do rio Tapajós a partir do uso não sustentável dos recursos hídricos, do desmatamento nas variáveis meteorológicas e a hidroclimatologia futura da bacia para os próximos 30 e 60 anos. Na questão hídrica, foram observados significativos impactos ambientais causados ao meio ambiente no Alto e Médio Tapajós, onde foram identificados usos não sustentáveis dos recursos hídricos dos variados setores da economia, com destaque ao aumento do número de indústrias e hidrelétricas. De modo inverso, na região do Baixo Tapajós ainda há significativas porções de cobertura vegetal conservada, as quais são essenciais para o favorecimento da evapotranspiração e, conseqüentemente, formação de nuvens, porém um aumento do uso não sustentável dos recursos hídricos foi observado na região. Na relação entre o desmatamento e o clima, notou-se a existência de correlações entre as taxas de desmatamento e variações positivas da temperatura na região do Médio Baixo Tapajós. Todavia não foram observadas variações significativas da precipitação, mas há uma leve tendência negativa (redução), corroborando com os estudos de anomalia e tendência. Na hidroclimatologia futura, os resultados demonstraram que os impactos futuros das mudanças climáticas nas medidas de precipitação e de cota, tanto para um clima mais próximo (2021-2050), como para um clima do final do século (2051-2080), levando em consideração os cenários moderado e pessimista. Notou-se ainda que haverá alterações na frequência dos extremos máximos e mínimos de precipitação e cota, principalmente nas regiões do Médio Baixo Tapajós, sendo mais sensível às essas mudanças na estação de Itaituba.

Palavras-chave: desmatamento; usos da água; clima; hidroclimatologia futura; Tapajós.

ABSTRACT

The intensification of land use and land cover has been increasing environmental and climatic problems in the Amazonian sub-basins, especially in the Tapajos River basin, which is important not only for the region, but for the whole country in terms of economic and socio-environmental issues. This research evaluated the increasing pressure imposed on the Tapajos River basin from the unsustainable use of water resources, deforestation on meteorological variables and the future hydroclimatology of the basin for the next 30 and 60 years. On the water issue, significant environmental impacts were observed in the Upper and Middle Tapajos, where unsustainable uses of water resources were identified from the various sectors of the economy, with emphasis on the increase in the number of industries and hydroelectric plants. Conversely, in the Lower Tapajos region there are still significant portions of conserved vegetation cover, which are essential for favoring evapotranspiration and, consequently, cloud formation, but an increase in the unsustainable use of water resources was observed in the region. In the relationship between deforestation and climate, it was noted the existence of correlations between deforestation rates and positive variations in temperature in the Middle Lower Tapajos region. However, no significant variations in precipitation were observed, but there is a slight negative trend (reduction), corroborating the anomaly and trend studies. In the future hydroclimatology, the results showed that the future impacts of climate change on precipitation and elevation measures, both for a more proximate climate (2021-2050) and for a climate at the end of the century (2051-2080), taking into account the moderate and pessimistic scenarios. It was also noted that there will be changes in the frequency of maximum and minimum extremes of precipitation and quota, especially in the regions of the Middle Lower Tapajos, being more sensitive to these changes at the Itaituba station.

Keywords: deforestation; water uses; climate; future hydroclimatology; Tapajos.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1- Denominação das sub-bacias do Tapajós: Baixo (verde musgo), Médio (preto) e alto (verde claro) e seus respectivos municípios. Em vermelho, desmatamento acumulado até 2020.....	21
Figura 1.2 – Bacias com cobertura florestal e pastagem. Onde: a) representa a bacia com cobertura florestal e b) bacia sem cobertura florestal (pastagem).....	24
Figura 1.3 - Projeções de mudanças de temperatura e chuvas na região tropical da América do Sul produzidas pelo conjunto de modelos do IPCC AR5 para 2046-2065 e 2081-2100 com cenários de baixas emissões (RCP2.6) e altas e emissões (RCP8.5).....	25
Figura 1.4 – Rodovias da Amazônia brasileira.....	27
Figura 1.5 – Estrutura da Tese.....	32
Figura 1.6 – Organograma da metodologia aplicada.....	33
Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia empregada.....	38
Figura 2.2 - Localização dos municípios dentro da bacia do Tapajós.....	40
Figura 2.3 - Produto Interno Bruto (PIB) das atividades econômicas desenvolvidas nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós.....	44
Figura 2.4 - Contextos da bacia do rio Tapajós: ocupação territorial e áreas protegidas.....	45
Figura 2.5 - Área (ha) dedicadas a lavoura (a) e a pastagem (b) nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós.....	46
Figura 2.6 - Número de estabelecimentos que utilizam a irrigação (a) e a quantidade de água consumida pela pecuária (b) nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós. Unidade: litros por dia.....	47
Figura 3.1 - Localização da bacia do rio Tapajós na Amazônia brasileira.....	74
Figura 3.2 - Taxa de desmatamento dos Estados da Amazônia Legal de 1988 a 2020...75	

Figura 3.3 - Localização das quadrículas selecionadas para a quantificação da relação entre desmatamento e precipitação e temperatura máxima e mínima: A) Posição das quadrículas nas regiões do Baixo, Médio e Alto Tapajós e, B) Área desmatada nas três sub-bacias.....	77
Figura 3.4. Fluxograma do resumo da metodologia utilizada para fazer a relação entre o desmatamento e o clima da bacia do Tapajós.....	78
Figura 3.5 - Anomalia da temperatura máxima (Tmax) das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017)	79
Figura 3.6 - Anomalia da temperatura mínima (Tmin) das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017)	81
Figura 3.7 - Anomalia da precipitação das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017)	82
Figura 3.8 - Densidade de desmatamento na bacia do rio Tapajós para os anos de 2010, 2013 e 2015.....	84
Figura 4.1- Localização das estações convencionais meteorológicas (INMET e ANA) e hidrológicas (ANA) sobre a bacia do rio Tapajós.....	100
Figura 4.2. Fluxograma do resumo da metodologia utilizada para avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso da bacia do Tapajós.....	105
Figura 4.3 - a) Climatologia mensal da precipitação e ciclo anual da cota fluviométrica e b) percentual mensal da precipitação para o período de 1991 a 2020.....	110

Figura 4.4 - Padrões climatológicos (1991 a 2020) da PREC no regime CHUV na bacia do Tapajós com os dados do CHIRPS e CRU, b) BoxPlot da PREC média na bacia nos dados das estações, CHIRPS e CRU, c) BoxPlot da CFLUV do regime de cheia nas cinco estações fluviométricas.....	111
Figura 4.5 - Diagrama de Taylor da PREC do regime CHUV considerando os dados observados (Estações, CHIRPS e CRU) e simulados pelos 35 MCGs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.....	113
Figura 4.6 - Mudança % da PREC do regime CHUV na bacia do Tapajós simulados pelos 35 MCGs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 nos dois períodos de 30 anos do clima futuro de 2021_2050 e 2051_2080.....	114
Figura 4.7 - Padrões espaciais das mudanças (%) da PREC do regime chuvoso considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os dois períodos futuros de 30 anos 2021 a 2050 e 2051 a 2080.....	116
Figura 4.8 - Desvio percentual da mudança do clima futuro em relação ao clima presente da PREC e CFLUV.....	118
Figura 4.9 - Distribuição de frequência de extremos máximos e mínimos de PREC e CFLUV. Sendo: barras em cinza representam a PREC e CFLUV no clima presente, as linhas em tons de verde o cenário SSP2-4.5 e as linhas em laranja e vermelho o cenário SSP5-8.5, para os dois períodos.....	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Distribuição percentual da área total dos municípios contida na bacia do rio Tapajós.....	39
Tabela 2.2 - Avaliação do quantitativo de água por município.....	41
Tabela 2.3 - Consumo de água por espécie em L dia-1 animal-1.....	42
Tabela 2.4 - Água consumida pela população nos municípios que compõem a bacia do rio Tapajós. Em destaque (*) aqueles que apresentam a sede municipal contida na bacia.....	48
Tabela 2.5 - Vazões de retiradas e consumidas pela indústria.....	52
Tabela 2.6 - Perfil do aproveitamento energético, segundo ANEEL (2020): UTE (Usina Termelétricas), PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas), UHE (Usina Hidrelétricas) e CGH (Central Geradora Hidrelétrica). Destino: SP (Serviço Público), PIE (Produção Independente de Energia), APE (Autoprodução de Energia) e REG (Registro).....	54
Tabela 3.1 - Análise estatística descritiva do clima sazonal da bacia do rio Tapajós para os períodos de 2011-12, 2014-15 e 2016-17.....	80
Tabela 3.2 - Resultados da correlação (r) e do coeficiente de determinação (R^2) entre o desmatamento x temperatura máxima (Tmax), desmatamento x temperatura mínima (Tmin) e desmatamento x precipitação, para as estações chuvosa (Chu+) e menos chuvosa (Chu-), calculados nas quadrículas selecionadas das sub-bacias do rio Tapajós para o período de 2008 a 2018.....	85
Tabela 3.3 - Resultados do teste de Mann-Kendall para as estações chuvosa e seca da precipitação e temperatura das estações chuvosa e seca e o desmatamento na bacia. Onde: Chu (chuvosa), Sec (seca), Tmax-chu (Temperatura máxima da estação chuvosa), Tmax-sec (Temperatura máxima da estação seca), Tmin-chu (Temperatura mínima da estação chuvosa) e Tmin-sec (Temperatura mínima da estação seca)	86
Tabela 4.1 - Estações convencionais de precipitação (PREC, INMET e ANA) e cotas (CFLUV, ANA)	101

Tabela 4.2 - Lista dos 35 GCMs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 SSP5-8.5.....	102
Tabela 4.3 - Características principais dos cinco SSPs.....	103
Tabela 4.4 - Teste-t de Student da diferença das médias entre o clima futuro (2021-2050 e 2050-2080) e clima presente da PREC e CFLUV. Sendo: valores em verde (significância de 90%) e em laranja (95%)	117

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
AGP	Agricultura/ Pastagem
ANA	Agência Nacional de guas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	rea de Proteção Ambiental
BIG	Banco de Informações de Geração
BSM	Barra de São Manuel
CCM	Complexo Convectivos de Mesoescala
CGH	Central Geradora Hidrelétrica
CFLUV	Cotas Fluviométricas
CHIRPS	<i>Clima Hazards Group InfraRed Precipitation with Station</i>
CHU+	Estaao chuvosa
CHU-	Estaao menos chuvosa
CHUV	Chuvoso
Clim_PREC	Climatologia da Precipitação
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Project Phase6</i>
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CRU	<i>Climatic Research Unit</i>
ENOS	El Niño Oscilação Sul
FON	Fontanilhas
GCMs	Modelos Climáticos Globais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	ndice de Desenvolvimento Humano

IND	Indeco
INIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas</i>
ITA	Itaituba
MC_POS	Melhores Conjuntos Positivo
MC_NEG	Melhores Conjuntos Negativo
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MMA	Módulo Meridional do Atlântico
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PIB	Produto Interno Bruto
PIE	Produção Independente de Energia
PREC	Precipitação
PRODES	Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite
RMSE	Erro Médio Quadrático
SAN	Santarém
SIDRA	Sistema IBGE de Recuperação Automática
SSP	<i>Shared Socio-Economic Pathways</i>
TEMP	Temperatura
UHE	Usina Hidrelétrica
UTE	Usina Termelétrica

VCAN	Vórtice Ciclone de Altos Níveis
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	20
1.1 Referencial Teórico	22
1.1.1 Consequências do desmatamento em bacias hidrográficas e o clima futuro.....	22
1.1.2 Aspectos socioeconômicos da bacia do rio Tapajós.....	26
1.2 Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa	28
1.5 Objetivos	30
1.5.1 Objetivo Geral.....	30
1.5.2 Objetivos Específico.....	30
1.6 Estrutura da Tese	30
CAPÍTULO 2 OS MÚLTIPLOS USOS DA ÁGUA NA BACIA DO TAPAJÓS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	34
2.1 Introdução	36
2.2 Material e Métodos	38
2.3 Resultados	43
2.4 Discussão	59
2.5 Conclusões	64
CAPÍTULO 3 - DESMATAMENTO E CLIMA SAZONAL DA BACIA DO RIO TAPAJÓS, NA AMAZÔNIA BRASIELIRA	70
3.1 Introdução	72
3.2 Material e Métodos	73
3.2.1 Área de Estudo.....	73
3.2.2 Dados utilizados.....	75
3.2.3 Procedimentos metodológicos.....	76
3.3 Resultados	78

3.3.1 Anomalia da precipitação e temperatura do ar nas estações chuvosa e seca da bacia do rio Tapajós.....	78
3.3.2 Análise integrada entre o desmatamento e a precipitação.....	83
3.4 Discussão.....	86
3.5 Conclusões.....	90
CAPÍTULO 4 IMPACTOS FUTUROS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO REGIME CHUVOSO E NAS CHEIAS SAZONAIS DA BACIA DO TAPAJÓS, NA AMAZÔNIA CENTRAL.....	96
4.1 Introdução.....	98
4.2 Material e Métodos.....	99
4.2.1 Dados.....	100
4.2.3 Metodologia.....	105
4.3 Resultados.....	109
4.4.1 Ciclo climatológico anual do regime chuvoso e de cheia sazonal.....	109
4.4.2 Padrões climatológicos da precipitação e cota no regime chuvoso do clima atual.....	110
4.4.3 Precipitação simulada e impactos na cota fluviométrica.....	114
4.4 Discussão.....	119
4.5 Conclusão.....	122
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL.....	130
5.1 Resultados chaves: impactos e implicações.....	130
5.2 Conclusão integrada.....	131
5.3 Limitações da metodologia utilizada e recomendações	131
REFERÊNCIAS.....	133

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, a região amazônica vem passando por grandes transformações que resultaram na degradação de uma enorme parcela de sua floresta, causando impactos ambientais (REIS; RIBEIRO, 2014).

Tais transformações têm gerado uma crescente preocupação com o meio ambiente, mais especificamente com a floresta amazônica e isso se deve a várias questões: pelos serviços ambientais oferecidos, como a biodiversidade, ciclagem de água e armazenamento de carbono (FEARNSIDE, 1997) e ainda por ser a responsável pelo clima, não somente local, mas de outras regiões brasileiras (centro-oeste e sul), pois é a partir dela que ocorre o transporte de água necessária para a formação de nuvens precipitantes (rios voadores) para esses locais (FEARNSIDE, 2015).

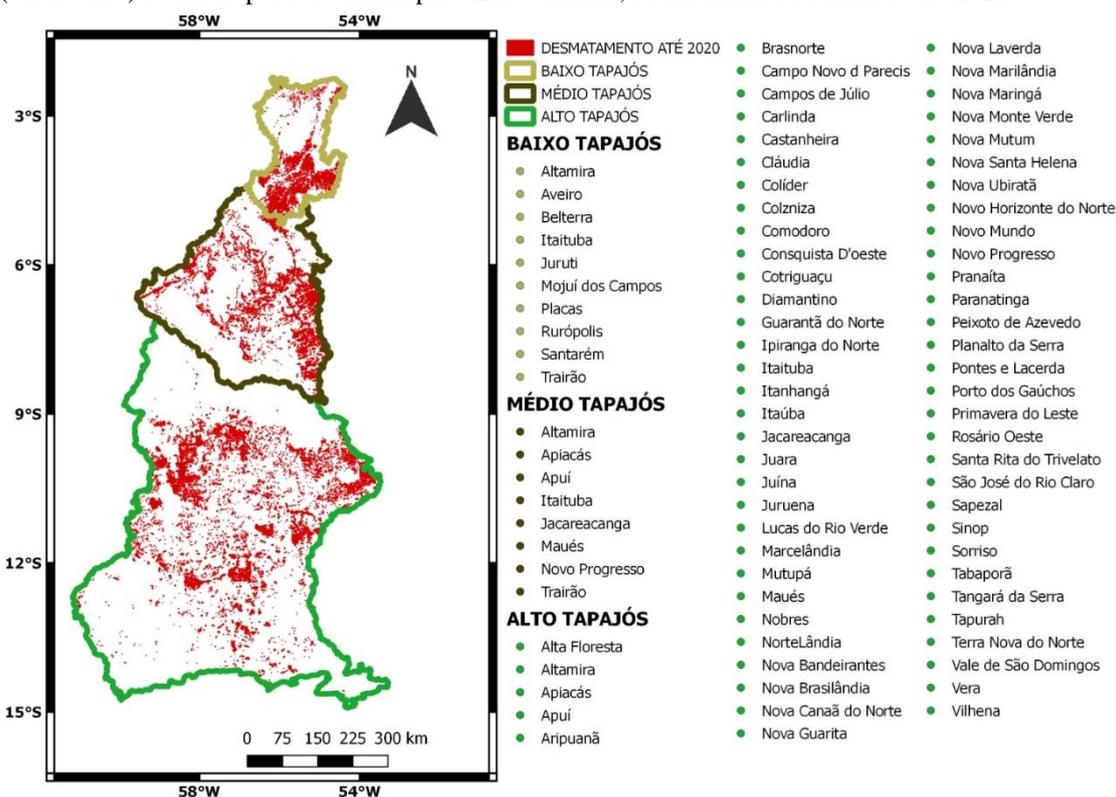
Um exemplo dessas transformações é o que está ocorrendo na bacia do rio Tapajós (afluente da margem direita da bacia Amazônica) que, nas últimas décadas, padece com degradações em sua região devido a pressão causada, principalmente, pelo aumento da economia do agronegócio (*boom* das exportações de produtos agrícolas e agroindustriais - HEREDIA; PALMEIRA; LEITE, 2010), que além do desmatamento para a plantação ainda tem a construção de rodovias para novas rotas de escoamento de grãos até o destino dos portos para exportação, como o de Itaituba (THÉRY, 2019). Além disso, a bacia tem outros os problemas como a construção de hidrelétricas, garimpos, atividades madeireiras etc.

Essa degradação é maior no alto Tapajós (Figura 1.1) por apresentar uma quantidade maior de atividades e assim desmatamento mais acentuado nessa porção da bacia. O Tapajós está inserido em dois biomas (cerrado e a floresta amazônica) com características físico-naturais diferentes. O Alto-Tapajós é composto, pelo cerrado, o Baixo-Tapajós pela floresta amazônica. A transição é complexa por apresentar gradientes de altitude e latitude e com isso um ecossistema de transição com áreas extra-amazônicas - formações de savana e florestas estacionais (ALARCON; MILLIKAN; TORRES, 2016).

Por outro lado, no Baixo-Tapajós a degradação tem aumentado, como é o caso do noroeste da bacia no qual grande parte das unidades de conservação, como o Parque Nacional da Amazônia, Florestas Nacionais Itaituba I e II, a Floresta Nacional de Crepuri

e a Proteção Ambiental Área de Tapajós tem tido diminuição em seus limites em decorrência da degradação pela mineração e construção de hidrelétricas na região da bacia do Tapajós (VERDUM; GAMBOA; BEBBINGTON, 2018; BIERI; PICANÇO, 2019).

Figura 1.1- Denominação das sub-bacias do Tapajós: Baixo (verde musgo), Médio (preto) e Alto Tapajós (verde claro) e seus respectivos municípios. Em vermelho, desmatamento acumulado até 2020.



A degradação da floresta afeta ainda a questão hídrica da bacia, especialmente a derrubada da floresta para atividades agrícolas e de pecuária, pois estas demandam grandes quantidades de consumo da água causando pressão pela oferta (CAMARA et al., 2019; TAHIRU et al., 2020; KUMAR et al., 2019). A irrigação é uma das práticas da agricultura que mais utiliza água, por outro lado a pecuária é a principal atividade da Amazônia (NASCIMENTO et al., 2015) que requer grandes quantitativos hídrica para a prática bovina. Além dessas atividades, a bacia ainda tem a demanda de água para a indústria (fabricação de alimentos, derivados do petróleo e de biocombustíveis), para a produção mineral (principal minério, o ouro), consumo humano (atendimento sem uso sustentável).

Estudos mostram que uma das consequências da conversão de floresta em pastagens será a diminuição da pluviosidade na Amazônia e nas regiões vizinhas (FEARNSIDE, 2003; SMITH; BAKER; SPRACKLEN, 2023), além do aumento da temperatura, as secas severas e enchentes (LOUREIRO et al., 2014).

As enchentes e secas são riscos derivados das mudanças climáticas e são frutos de estudos, nas últimas décadas, de modelos climáticos na simulação de precipitação para o clima futuro (MARENGO, 2008; SOUZA JÚNIOR; MARENGO, 2018). Essa variável ainda não tem consenso nos resultados apresentados pelos modelos climáticos se haverá aumento ou diminuição na Amazônia, e por isso é necessário estudos mais pontais para sinalizar os governantes frente as mudanças encontradas nas simulações dos modelos. Além disso, essa variável influencia diretamente na cota fluviométrica, no qual está associada ao cotidiano das comunidades amazônicas que utilizam os rios para se locomoverem na maior parte das regiões sendo, por tanto, de grande valia para as tomadas de decisão, especialmente aos impactos gerados nas comunidades mais vulneráveis.

1.1 Referencial Teórico

1.1.1 Consequências do desmatamento em bacias hidrográficas e o clima futuro

O desmatamento na Amazônia brasileira tem aumentado continuamente desde 1991, variando de acordo com as mudanças relacionadas às forças econômicas, sendo provável que o desmatamento futuro aumente ainda mais rapidamente por causa da constante expansão da rede de estradas (para o escoamento de grãos), o que vem sendo confirmado (FEARNSIDE, 2006; FERREIRA; COELHO, 2015; LAPOLA et al, 2023).

A vegetação tem um papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de volumes de água, e com o desmatamento esse balanço e fluxo afetam os recursos naturais e comprometem o equilíbrio do planeta em seus diversos elementos, incluindo os ecossistemas e suas bacias hidrográficas (TUCCI; CLARKE, 1997) (Figura 1.2).

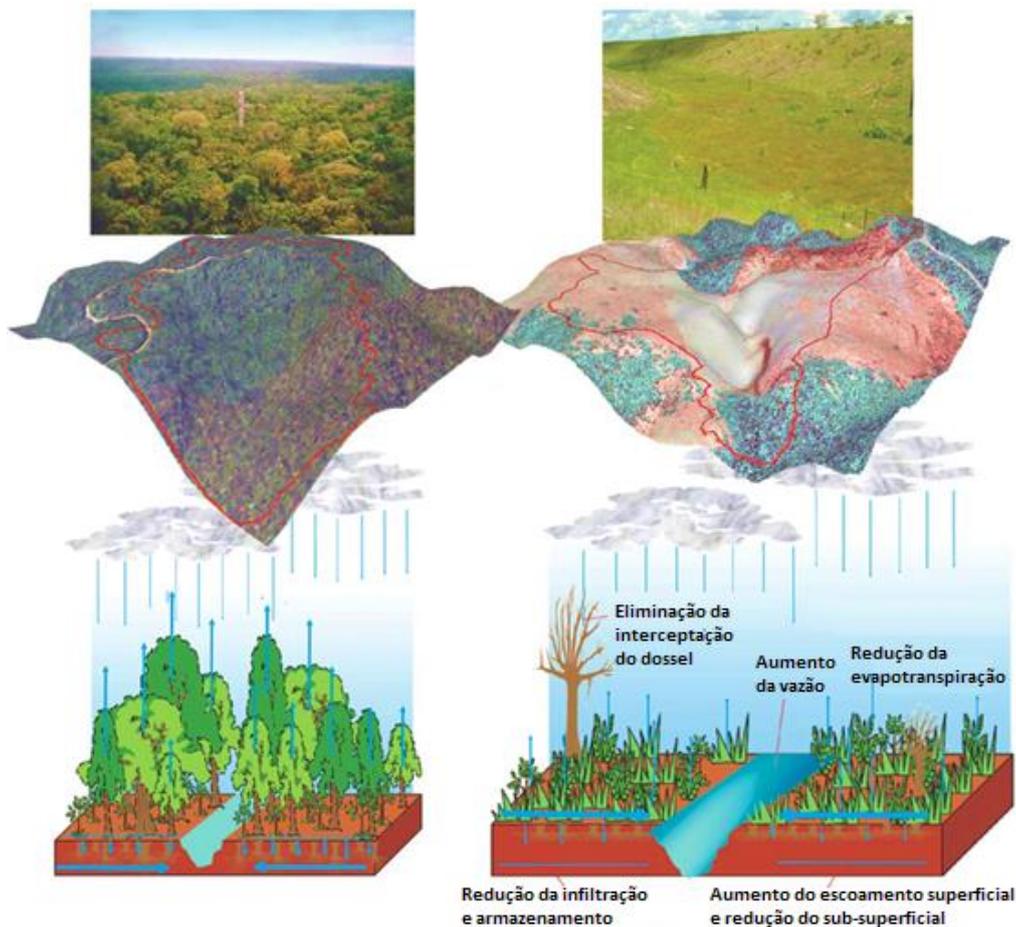
Experimentos em bacias hidrográficas confirmam que a vazão aumenta com a retirada da floresta (BOSCH; HEWLETT, 1982; SOUZA FILHO et al., 2016). Nas bacias do Rio Ji-Paraná (RO), Rio das Almas (GO) e Rio Jacuí (RS) ocorreu aumento da vazão

em consequência do crescimento da área desmatada (BAYER; COLLISCHONN, 2013). Além da vazão, o escoamento superficial também aumenta quando ocorre o desmatamento, sendo mais significativo na estação seca (NÓBREGA, 2014). Por outro lado, uma menor quantidade de água é interceptada pelo dossel, a evapotranspiração e a infiltração também tendem a diminuir com o desmatamento (COSTA; BOTTA; CARDILLE, 2003).

Com o desmatamento, no solo descoberto, podem ocorrer alterações em suas propriedades por conta do impacto das gotas de chuva, ocasionando diminuição de infiltrações (SILVA; RODRIGUES, 2013). Essa redução na infiltração, ocorre pela falta de matéria orgânica no solo - importantes para facilitar a infiltração e a recarga da água (CHENG; LIN; LU, 2002; BEST et al., 2003).

Ao diminuir a transpiração com a derrubada da floresta, o desmatamento geralmente resulta na subida do lençol freático, chegando a atingir a superfície nas áreas mais baixas, gerando um aumento das áreas superficialmente saturadas (RUPRECEHET; SCHOEFIELD, 1989).

Figura 1.2 – Bacias com cobertura florestal e pastagem. Onde: a) representa a bacia com cobertura florestal e b) bacia sem cobertura florestal (pastagem).



Fonte: Trancoso, Carneiro Filho e Tomasella (2007).

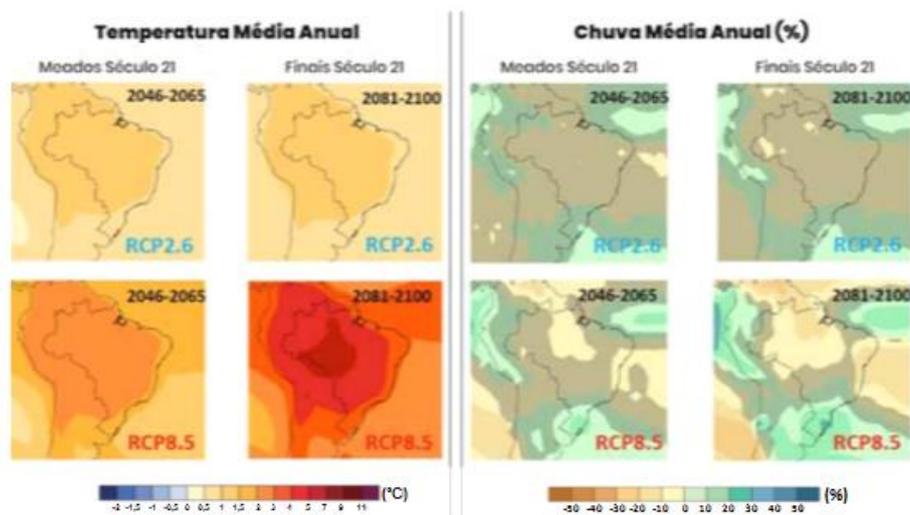
Além de influenciar no fluxo das bacias hidrográficas, o desmatamento tem contribuído de forma significativa para o aquecimento global (RODRIGUES-FILHO et al., 2008). Um exemplo dessa contribuição é a imensa quantidade de partículas e gases emitidos pelas queimadas que geram profundos efeitos nos climas regional e global (ARTAXO, 2006).

A presença de aerossóis de queimadas apresenta uma forte supressão da formação de nuvens rasas, com possível impacto no ciclo hidrológico (SILVA DIAS; COHEN; GANDÚ, 2005; OLIVEIRA et al., 2020). Vários estudos mostram a importância da floresta Amazônica, especialmente quanto à contribuição de precipitação, oriunda da advecção de umidade para outras regiões (ROCHA et al., 2017; CORREIA et al., 2007).

A mudança no uso da terra na Amazônia pode provocar consequências climáticas e ambientais em todas as escalas, resultando na alteração dos ciclos da água, energia solar, carbono e nutrientes (COHEN et al., 2007). O aumento da temperatura (em torno de 4 °C) e a redução da precipitação (40%) são exemplos de tais consequências (Figura 1.3). Esse aquecimento e a possível diminuição da precipitação podem ter impactos importantes sobre a manutenção do bioma amazônico (MARENGO, 2007).

As mudanças mais expressivas no clima futuro devem ocorrer no setor sudeste/leste da Amazônia com indicações de reduções de até 30% no volume de chuva do trimestre junho, julho e agosto numa grande área que abrange o norte do Mato Grosso e Tocantins, sudeste do Pará e leste do Maranhão (SOUZA et al., 2016).

Figura 1.3 - Projeções de mudanças de temperatura e chuvas na região tropical da América do Sul produzidas pelo conjunto de modelos do IPCC AR5 para 2046-2065 e 2081-2100 com cenários de baixas emissões (RCP2.6) e altas emissões (RCP8.5).



Fonte: Souza Júnior e Marengo (2018).

Com as mudanças climáticas, os cenários de aumento da temperatura e a diminuição da precipitação tendem a aumentar a evapotranspiração e o escoamento superficial, a infiltração e a evaporação. Na estação seca, o escoamento superficial tende a aumentar consideravelmente, e se a taxa anual de desmatamento permanecer a mesma ou aumentar, problemas socioambientais podem agravar, tanto na estação seca, quanto na estação chuvosa (NÓBREGA, 2014).

1.1.2 Aspectos socioeconômicos da bacia do rio Tapajós

A bacia do rio Tapajós é a quinta bacia hidrográfica em extensão (492.263 km²), quando se leva em consideração a bacia amazônica, possui uma população de 1.169.958 habitantes, sendo que desses 801.500 vivem na área urbana e 368.458 na área rural da bacia, sua densidade demográfica é de 2,4 hab/km² e o crescimento demográfico é de 2,64% (ANA, 2011). Em 2021 a população aumentou para 2.094.067, de acordo com o dado estimado estatisticamente pelo IBGE, considerando o valor total da população nos 74 municípios que compõem a bacia.

Os municípios localizados dentro da bacia, em sua maioria, que possuem alta densidade populacional, se encontram no médio-baixo Tapajós assim como os piores valores de mortalidade infantil e percentual de domicílios inadequados. O contrário ocorre em relação ao IDH e o índice de capacidade financeira, no qual os valores mais significativos estão nos municípios localizados no médio-alto Tapajós (ANA, 2013).

Em 2005, a bacia possuía um PIB de aproximadamente 13 bilhões e um PIB *per capita* de 11,61. O valor do PIB está relacionado as atividades econômicas praticadas na região da bacia: agricultura comercial e de subsistência, pecuária extensiva e intensiva, extrativismo vegetal e animal, extrativismo mineral, mineração empresarial e a pesca e aquicultura (ANA, 2011). Além da agricultura comercial e de subsistência, um outro tipo exercido é a agricultura familiar, sendo a predominante na região, cultivada nas várzeas dos rios e ao longo das rodovias (CEPEL, 2014).

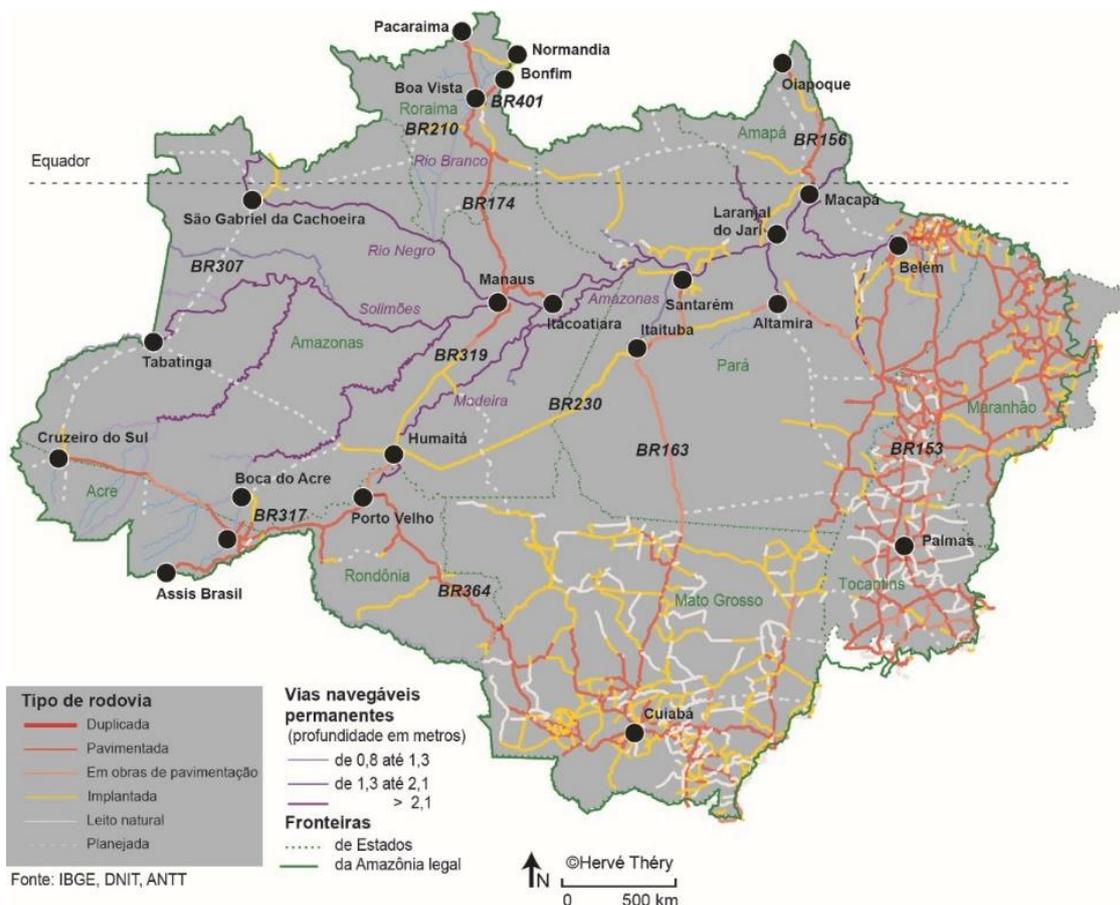
As atividades econômicas da Amazônia nasceram em meio a uma política autoritária e em uma combinação entre o capital físico com a natureza (ciclo da borracha). A estratégia do governo federal era uma redistribuição de ativos públicos, que se dava através da concessão dos recursos financeiros para um progresso dos projetos de “colonização” da região amazônica. Tal estratégia ocorreu em um período autoritário (1964 a 1984), no qual prevaleceu a orientação de um macrofunção de produção caracterizada por abundância de terras e escassez de trabalho e capital (COSTA, 2012).

É perceptível que desde os primeiros contatos com a Amazônia, a intenção era apenas suprir aos interesses externos, não sendo, em nenhum momento, levado em conta o fator nativo e muito menos o quanto a floresta seria importante para os povos que ali viviam (PIMENTEL, 2014). O autor menciona que a partir de 1960 a Amazônia vivia o

seu quarto devassamento, em que se tinha terras abundantes e falta de gente para trabalhar, o que deu margem para que houvesse a abertura de estradas e a intensificação da penetração de nordestinos e sulistas (pessoas advindas da região sul do país). Sendo esse o mais significativo dos quatro porque agora insere a Amazônia no mercado internacional o que vai fazer com que o homem amazônico perca sua identidade e a natureza (OLIVEIRA NETO, 2019).

O governo brasileiro (décadas de 60 e 70) destinou grandes recursos financeiros para a construção de rodovias e para projetos industriais e agropecuários que foram implantados nos eixos rodoviários como a Transamazônica, Porto Velho-Cuiabá e Cuiabá-Santarém (Figura 1.4), e tiveram 100 km de rodovias em terras para uso federal, com o propósito de inserir na Amazônia projetos de colonização (OLIVEIRA NETO, 2019).

Figura 1.4 – Rodovias da Amazônia brasileira.



Fonte: Oliveira Neto (2019).

A rodovia BR-163 (Cuiabá-Santarém) é um dos projetos mais antigos de integração entre o Centro-Oeste do Brasil e a Amazônia com o intuito de escoar a produção agrícola até as cidades de Santarém e Itaituba, no estado do Pará (OLIVEIRA NETO, 2019).

A Cuiabá-Santarém possui 1.780 km e atravessa uma das áreas mais importantes da Amazônia do ponto de vista econômico, ambiental e diversidade étnica e cultural. Ela atravessa dois biomas: o cerrado e a floresta amazônica, onde estão inseridas as bacias hidrográficas dos rios Tapajós e Xingu (ROCHA; FAGG, 2015).

A construção da rodovia com a responsabilidade de propor estratégias de controle ao desenvolvimento da região, gerou (gera) uma atividade de grandes impactos diretos sobre o ecossistema. Sem asfalto a rodovia já causou grandes prejuízos ao meio ambiente e com a pavimentação aumenta grandemente o impacto sobre o desmatamento na área circunvizinha, acelerando a destruição da floresta não somente nas proximidades à rodovia, mas nas áreas sob sua influência (FEARNSIDE, 2007).

Além dos impactos no meio ambiente gerados pela construção da Cuiabá-Santarém, o desmatamento da região com incremento de queimadas, provoca um aumento de problemas respiratórios, principalmente em crianças menores de cinco anos de idade e idosos (ROCHA; FAGG, 2015).

O discurso do governo federal de trazer desenvolvimento e sustentabilidade a partir da construção da rodovia em questão gera preocupação em relação aos conflitos por disputas de terras em muitos municípios da bacia do Tapajós, como Santarém, Itaituba, Novo Progresso e Sinop - localizados nos estados do Pará e Mato Grosso, e a busca de solução para esses conflitos, já que os objetivos para o modelo de desenvolvimento estão focados especialmente aos setores da mineração e do agronegócio, deixando em segundo plano a questão ambiental e os interesses da população (BRITO; CASTRO, 2018).

1.2. Justificativa e interdisciplinaridade da pesquisa

A bacia do Tapajós é uma das bacias mais ameaçadas da Amazônia por causa dos diversos investimentos econômicos na região, na qual os programas de mitigação não têm

sido suficientes para enfrentar a implantação de projetos ocorridos devido a incentivos fiscais do governo federal para que houvesse uma expansão do desenvolvimento na Amazônia (RAMBALDI; OLIVEIRA, 2005). Desses incentivos surgiram as usinas hidrelétricas (SANTOS et al, 2018), rodovias, o agronegócio, a indústria, a mineração e tantos outros, o que faz com que a bacia do Tapajós se tornasse cada vez mais vulnerável frente a tantas pressões.

Uma das pressões mais atuais foi a construção da rodovia BR-163 (NEVES et al., 2021), planejada desde a década de 1970, a partir da lógica do integrar para não entregar, e que nos últimos anos vem sendo consolidada com o objetivo de viabilizar o desenvolvimento da região que ela abrange e o escoamento de grãos (milho e soja) do estado do Mato Grosso até o chamado Arco Norte, no Pará para que seja exportado aos consumidores internacionais.

Tal construção não alcançou o desenvolvimento e vem contabilizando prejuízos tanto aos setores do meio ambiente quanto ao socioeconômico (BRITO; CASTRO, 2018). No meio ambiente é visível o desmatamento, não somente pela abertura da rodovia, mas pela implantação de áreas para a agricultura, pecuária, indústrias, pela grilagem de terras, dentre outros.

Vários são os impactos causados ao meio ambiente, um deles é o aumento na vazão dos rios pelo aumento do escoamento superficial nas áreas desmatadas, pois o desmatamento diminui a infiltração. Outro impacto é a diminuição da precipitação local, pois com a retirada da vegetação a evapotranspiração diminui alterando o ciclo hidrológico. E no social, os conflitos socioeconômicos em decorrência à pobreza e a má distribuição de renda que atingem a maioria devido às precaríssimas políticas de ordenamento territorial (FEARNSIDE, 2006).

A bacia do Tapajós padece com grandes pressões desde a inclusão de projetos pensados pelo governo federal a fim de colonizar a Amazônia e desenvolver seu crescimento econômico, sendo feito às custas da degradação ambiental da região. Aos serviços oferecidos pela floresta (ar, água, ciclos bioquímicos globais de sustentação da vida, clima, dentre outros) não é dada a importância necessária e os efeitos desse descaso é observado no aumento de eventos extremos de chuva e secas ocorridos nas últimas décadas, bem como a cobertura vegetal.

Assim, busca-se, construir uma visão holística das variáveis climáticas e socioambiental da bacia do Tapajós, favorecendo uma análise interdisciplinar que pondere os pontos de vista referentes as variáveis em questão, considerando o passado, as dinâmicas do presente e projeções futuras para os próximos 30 e 60 anos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar os impactos hidrometeorológicos e socioambientais atuais e futuros (2021-2050/2051-2080) da bacia hidrográfica do rio Tapajós.

1.3.2 Objetivos Específicos

I - Descrever os múltiplos usos da água na bacia do rio Tapajós;

II - Analisar a relação entre o desmatamento e o clima atual da bacia do Rio Tapajós;

III - Avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso (precipitação) e de cheias sazonais (cota fluviométrica) da bacia do Tapajós na Amazônia central.

1.4 Estrutura da Tese

A tese está estruturada em 5 capítulos como segue: O **capítulo 1** é composto pela introdução geral e pelo referencial teórico que apresentam alguns aspectos que julgamos importantes sobre a bacia no que concerne as relações entre o desmatamento, a bacia e o clima futuro. Buscou-se mostrar a situação socioeconômica da bacia e como ela afeta a floresta local. Além disso, neste capítulo, é apresentada a justificativa e os objetivos que norteiam os estudos desta tese.

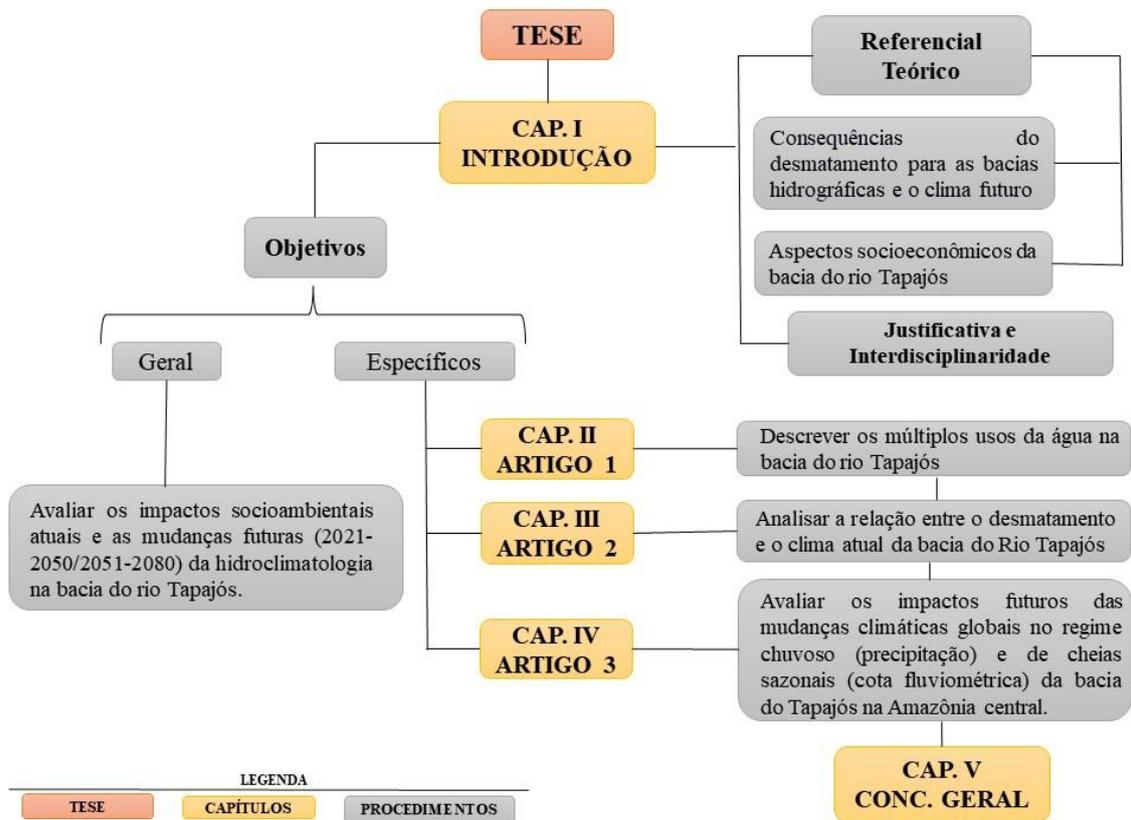
No **capítulo 2** é apresentado o primeiro artigo científico que faz uma análise geoespacial integrada dos múltiplos usos da água nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós.

O **capítulo 3** apresenta uma análise da relação entre o desmatamento local e as variáveis meteorológicas, precipitação e temperatura do ar, para o período menos chuvoso e mais chuvoso, e naqueles anos sem a ocorrência dos eventos do ENOS sobre a bacia.

No **capítulo 4**, são apresentados os impactos futuros das mudanças climáticas no regime chuvoso e nas cheias sazonais nos cenários de emissões de gases de efeito estufa, moderado e pessimista, em dois períodos futuros (um mais próximo do atual e outro mais próximo do final do século)

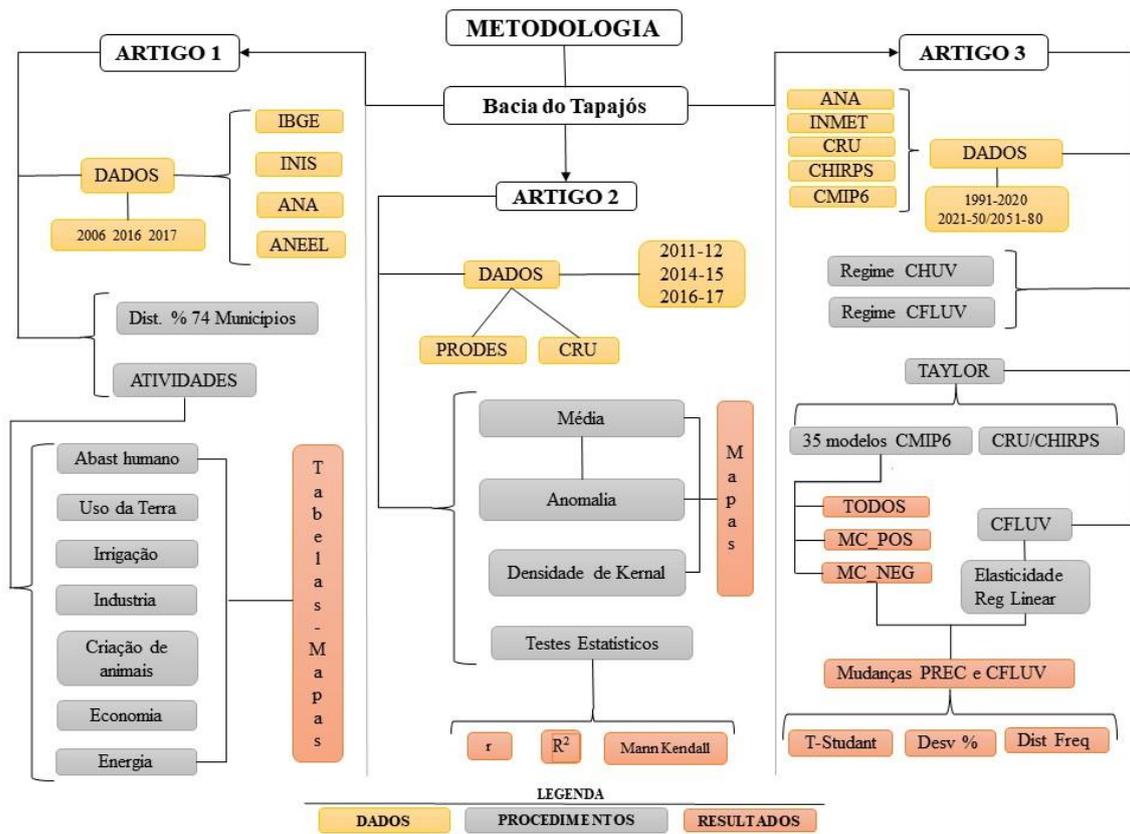
E no **capítulo 5**, faz-se a conclusão geral dos estudos realizados no qual são apresentados os resultados mais expressivos, as prioridades para as pesquisas futuras e as considerações finais. Na sequência são apresentados o esquema da estrutura da tese (Figura 1.5) e o organograma da metodologia aplicada (Figura 1.6).

Figura 1.5 – Estrutura da Tese.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 1.6 – Fluxograma da metodologia aplicada.



Fonte: Elaborado pela autora.

CAPÍTULO 2 OS MÚLTIPLOS USOS DA ÁGUA NA BACIA DO TAPAJÓS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA¹

RESUMO

Este estudo apresenta uma análise geoespacial integrada dos múltiplos usos da água nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós (na bacia amazônica), com ênfase em dados secundários do Produto Interno Bruto (PIB), atividade agrícola, consumo de água na indústria, para fornecimento humano e geração de energia hidrelétrica que foram obtidos dos sistemas eletrônicos do IBGE, ANA, SNIS, ANEEL, SIDRA, MDR e BIG. A metodologia foi aplicada para obter um diagnóstico integrado na bacia hidrográfica. Os resultados demonstram o alto grau de fragmentação ao longo da bacia. A maior concentração de atividades com consequentes pressões mais altas nos recursos hídricos é evidente na região do curso médio-alto e menores pressões no curso médio-baixo da bacia, pelo efeito de manutenção das áreas protegidas. Os principais cenários de uso múltiplo da região não são favoráveis ao manejo sustentável dos recursos hídricos na bacia do rio Tapajós, pois tornam sua zona de recarga mais vulnerável às intensas ações de uso da terra e maior consumo de água para o setor produtivo (agricultura e energia hidrelétrica) e suprimento humano, sendo necessário um acompanhamento temporal e espacial na bacia por parte de estados e municípios reforçando-se a necessidade de se instituir ou fortalecer instrumentos de regulação das águas.

Palavras-chave: municípios; consumo de água; agricultura; indústria e energia.

¹ Publicado: FRANCO, V. S.; LIMA, A. M. M.; SOUZA, E. B.; SODRÉ, G. R. C.; SANTOS, D. C. Os múltiplos usos da água na bacia do Tapajós na Amazônia Brasileira. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, p. 562-581, 2021.

ABSTRACT

This study presents an integrated geospatial analysis of the multiple uses of water in the municipalities located in the Tapajos River basin (in the Amazon basin), with emphasis on secondary data on gross domestic product (GDP), agricultural activity, water consumption in industry, for human supply and hydroelectric power generation that were obtained from the electronic systems of IBGE, ANA, INIS, ANEEL, SIDRA, MDR and BIG. The methodology was adequate to obtain an integrated diagnosis of the hydrographic basin. The results show the high degree of fragmentation along the basin. A higher concentration of activities with consequent higher pressures on water resources is evident in the upper-middle course and lower pressures in the lower-middle course of the basin, due to the effect of protected areas. The main scenarios of multiple use in the region are not favorable to the sustainable management of water resources in the Tapajos River basin, as they make its recharge zone more vulnerable to intense land use and greater water consumption for the productive sector (agriculture and hydroelectric power) and human supply, requiring temporal and spatial monitoring in the basin by the states and municipalities, reinforcing the need to establish or strengthen instruments for water regulation.

Keyword: Municipalities; water consumption; agriculture; industry and energy

2.1 Introdução

A bacia Amazônica é uma região de grandes contrastes naturais e humanos com a gestão de seus recursos naturais, em especial o binômio água e floresta, dependente do nível de articulação institucional de estados e municípios. Um dos elementos de maior dificuldade para o estudo está nas dimensões do seu território e complexidade de ambientes, envolvendo uma densa malha hídrica e o isolamento geográfico de algumas áreas, o que amplia o desafio. A escala regional de análise na questão hídrica, envolvendo a sua tipologia e a avaliação de disponibilidade, além de interagir com a expansão das ações antrópicas como: o desmatamento, a mineração, e a monocultura de grãos (MMA, 2006); enfrenta o entrave da falta ou insuficiência de meios de monitoramento quantitativo e qualitativo das águas superficiais, subterrâneas e atmosféricas.

O balanço da disponibilidade hídrica da bacia Amazônica é por vezes tratado como de menor importância, quando comparado com regiões que acusam problemas de escassez hídrica quantitativa e qualitativa, como as bacias do Tocantins (SILVA; TERESA, 2017), do São Francisco (ASSIS; RIBEIRO; MORAES, 2018) e do Parnaíba (MARÇAL; SILVA, 2017). Nestas a demanda e a disponibilidade confrontam-se gerando conflitos de usuários, seja por elementos climáticos, ou pela perda qualitativa das águas pela poluição. Já na bacia Amazônica as questões se ampliam, por exemplo para o avanço do desmatamento em áreas de maior vulnerabilidade como as de recarga hídrica ou as de várzea (LYRA; CHOU; SAMPAIO, 2016); o que não exclui a escassez hídrica por variáveis climáticas que ocorre na zona de transição (borda de bacia), sendo um dos elementos de maior recorrência, a existência de eventos extremos (causando cheias e estiagens) (LIMBERGER; SILVA, 2018), o que afeta as condições tanto de navegabilidade quanto de abastecimento para consumo humano, agravando as condições sociais de vários municípios da região (COUTINHO et al., 2017).

Dentre as bacias hidrográficas componentes da grande bacia Amazônica, destaca-se a bacia do rio Tapajós que compõe uma zona limite entre a Amazônia Oriental e Ocidental, além de apresentar uma variabilidade climática que interliga a região central do Brasil (Planalto Central) a faixa equatorial, influenciando desde o comportamento da precipitação, a química das águas, pelas variações geológicas e de uso da terra existentes (SILVA et al., 2018; COSTA JUNIOR et al., 2018). A bacia do rio Tapajós

tem sua cabeceira localizada no estado do Mato Grosso, na região conhecida como o arco do desmatamento (Pará, Mato Grosso, Maranhão, Tocantins, Rondônia e Acre), onde a fronteira agrícola avança em direção à floresta, além de uma extensa área destinada a pecuária (CARVALHO; DOMINGUES, 2016). Tais atividades (agrícola e pecuária) demandam grandes quantidades de consumo de água, o que gera a pressão pela oferta em termos quantitativos e qualitativos (CAMARA et al., 2019; TAHIRU et al., 2020; KUMAR et al., 2019), não somente no rio Tapajós, mas em seus tributários (SANTOS et al., 2018; SILVA; GHILARDI, 2017).

A agricultura é um dos setores que mais utiliza água através da prática da irrigação, sendo imprescindível onde a segurança produtiva é bastante afetada pela escassez contínua de água (ANA, 2020). A pecuária, de acordo com Nascimento et al. (2015) é a principal atividade da Amazônia, tendo impactos sociais e ambientais, tais como, a perda das funções da floresta na ciclagem da água e armazenamento do carbono. Apesar da forte vocação agropecuária, a demanda industrial ocorre nos polos regionais de Itaituba (PA) e Santarém (PA), esta é potencialmente voltada ao agronegócio, principalmente o relacionado aos grãos, destacando a produção da soja, porém existem ainda atividades relacionadas a fabricação de produtos alimentícios, de derivados do petróleo e de biocombustíveis, além da produção mineral, em especial o ouro (ANA, 2017). Estas favorecem a economia local, porém a falta de planejamento tem produzido também impactos ambientais, e aumento do consumo de água.

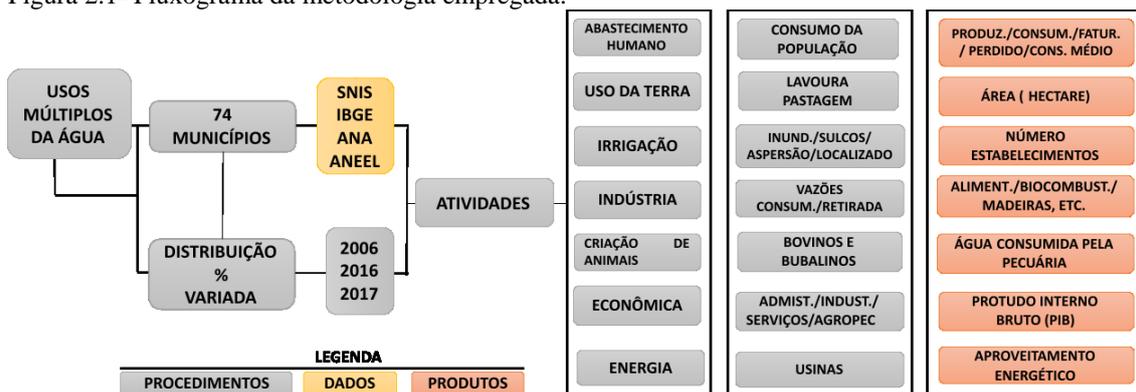
O abastecimento de água para consumo humano, associado ao saneamento básico, é um outro agravante local, pois os municípios componentes não apresentam o percentual de atendimento que implique em um uso sustentável das águas; em Santarém é verificado, que apesar do volume de água do rio Tapajós, o abastecimento preferencial é por poços, e o lançamento sem tratamento do esgotamento sanitário nos cursos d'água, cujos efeitos não são contabilizados pela falta de monitoramento qualitativo das águas (MAIA; FERNANDES; TEIXEIRA, 2016; SANTARÉM, 2019). Este uso é confrontado com outro identificado, que é o aproveitamento do potencial hídrico para geração de energia elétrica. A construção e funcionamento de usinas hidrelétricas e centrais geradoras de energia representam um potencial real da região, provocando impacto na vida da população, na flora e fauna locais, por interferirem no traçado natural e no volume de água dos rios (WITTMANN; JUNK, 2016). Este cenário ilustra a necessidade de se detalhar melhor estas relações e as situações de causa e efeito desta forma buscou-se

analisar os múltiplos usos da água nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós, na Amazônia brasileira, com o objetivo de avaliar seus efeitos e os possíveis instrumentos de gestão.

2.2 Material e Métodos

A bacia do rio Tapajós é um importante afluente localizado na margem direita da bacia Amazônica. É composta por 74 municípios (Figura 2.2 e Tabela 2.1) de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), sendo 12 municípios localizados no estado do Pará (PA), 2 no Amazonas (AM), 1 em Rondônia (RO) e 59 no Mato Grosso (MT). A Figura 2.1 mostra o resumo dos procedimentos metodológicos utilizado neste estudo.

Figura 2.1- Fluxograma da metodologia empregada.



Os dados utilizados são referentes às atividades econômicas, formas de uso da terra, quantidade de água consumida (criação de animais, indústria e abastecimento humano), irrigação, indústria e geração de energia elétrica. Estes foram obtidos principalmente dos sistemas eletrônicos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019); do Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA, 2019); do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos da Agência Nacional de Águas (ANA, 2020); do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), disponível no site do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR); do Banco de Informações de Geração (BIG) vinculado à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2020).

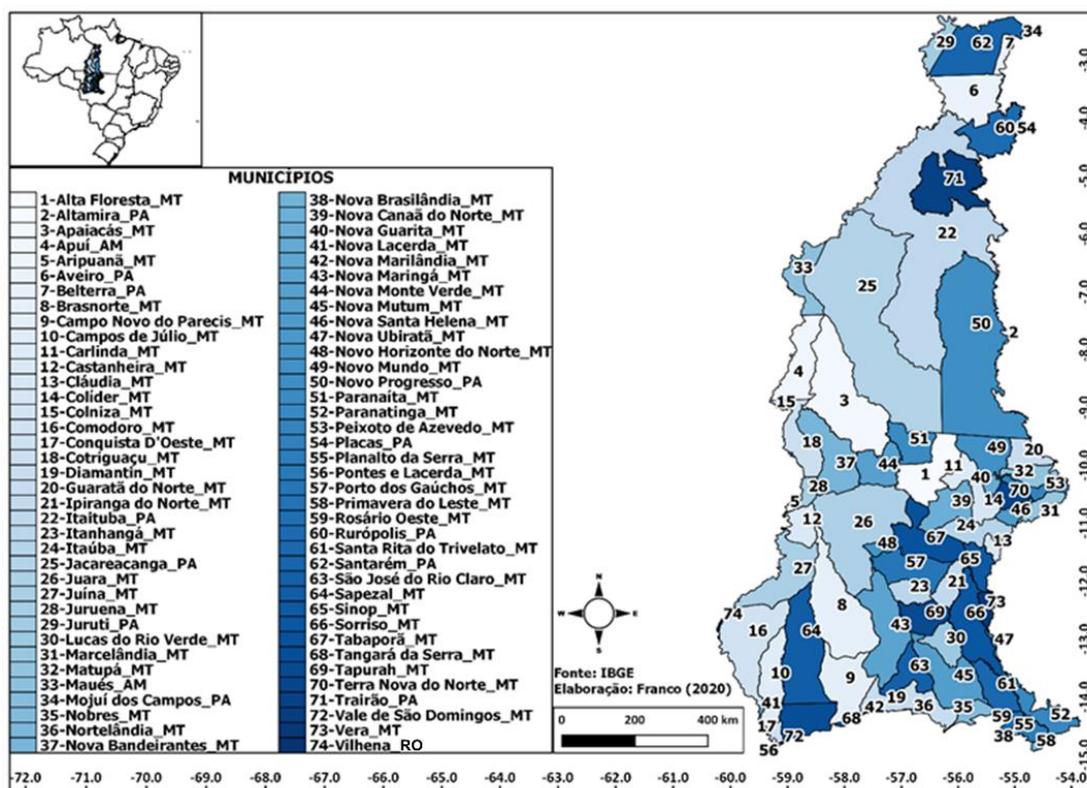
No seu processamento foram organizados e sistematizados em um sistema de informações geográficas (QGis) para geração da cartografia referente.

A Tabela 2.1 indica que existem 21 municípios que apresentam menos que 25% de sua área total contida na área da bacia (caracterizando principalmente seu limite de borda); 11 entre 25 e 50%; 08 de 50 a 75% e 34 mais que 75%, sendo estes dois últimos os principais influenciadores da dinâmica socioeconômica da região. Em função da representatividade menor que 3%, do total da área da bacia, os municípios pertencentes aos estados do AM e RO não serão priorizados nas análises.

Tabela 2.1 - Distribuição percentual da área total dos municípios contida na bacia do rio Tapajós.

Área relativa	PA	MT	AM e RO
< 25%	Altamira, Mojuí dos Campos, Placas	Colniza, Vale de São Domingos, Apaiaçás, Aripuanã, Marcelândia, Nortelândia, Nova Brasilândia, Nova Lacerda, Nova Marilândia, Nova Ubiratã, Paranatinga, Peixoto de Azevedo, Pontes e Lacerda, Primavera do Leste, Rosário Oeste	Apuí, Maués, Vilhena
De 25 a 50%	Jacareacanga, Juruti, Novo Progresso, Santarém	Conquista D'Oeste, Cláudia, Juína, Juruena, Matupá, Nobres, Tapurah	
De 50 a 75%	Aveiro, Belterra	Nova Santa Helena, Comodoro, Cotriguaçu, Itaúba, Tangará da Serra, Vera	
> 75%	Itaituba, Trairão, Rurópolis	Ipiranga do Norte, Itanhangá, Santa Rita do Trivelato, Alta Floresta, Brasnorte, Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Carlinda, Castanheira, Colíder, Diamantino. Guaratã do Norte, Juara, Lucas do Rio Verde, Nova Bandeirantes, Nova Canaã do Norte, Nova Guarita, Nova Maringá, Nova Monte Verde, Nova Mutum, Novo Horizonte do Norte, Novo Mundo, Paranaíta, Planalto da Serra, Porto dos Gaúchos, São José do Rio Claro, Sapezal, Sinop, Sorriso, Tabaporã, Terra Nova do Norte	

Figura 2.2 - Localização dos municípios dentro da bacia do Tapajós.



Observa-se que a totalidade dos municípios paraenses está localizada no Baixo-Médio curso do rio Tapajós, de acordo com a classificação de Santos et al. (2014), e os pertencentes ao estado do Mato Grosso no Médio-Alto curso.

As atividades econômicas estão relacionadas ao valor do PIB (multiplicados por R\$ 1000) de cada município, disponíveis para o ano de 2016. Quanto as formas de uso da terra, estas foram baseadas em IBGE (2019), no qual os dados estavam disponíveis para o ano de 2017 e classificadas segundo: Lavouras (permanentes, temporárias e área para cultivo de flores) e Pastagens (naturais, plantadas em boas condições, plantadas em más condições). Estas foram priorizadas pela maior extensão em área, sendo o extrativismo vegetal (notadamente a madeira) ora mais restrito, ora ligado a frentes de desmatamento. Na parte da lavoura não foram considerados os dados de área para cultivo de flores porque não existiam dados para todos os municípios em estudo.

O número de estabelecimentos com uso de irrigação foi obtido via consulta ao SIDRA (2019), onde foram observadas seis formas de irrigação segundo indicadores da agricultura familiar e não familiar – FAO, do ano de 2006: inundação, sulcos, aspersão

(pivô), aspersão (outros), localizado e outros métodos de irrigação ou molhação. Como o objetivo era verificar a quantidade de estabelecimentos de irrigação em cada município, usou-se o valor total de todas as seis formas em cada município (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Avaliação do quantitativo de água por município.

Natureza	Fonte	Ano	Definição
Quantidade de água consumida – abastecimento humano (C_{ah})	SNIS	2017 para maioria dos municípios	V_p (%) = $(V_g - V_c)$ C_{md} (l/hab. dia) = $P_T * C_{md} / 10^{-3}$ Onde: volume faturado (V_f), perdido (V_p), gerado (C_g); consumo médio (C_{md}); volume consumido (C_c); população atendida (P_T)
Quantidade de água – indústria (C_{id})	ANA	2017	$C_{id} = q_r + q_c$; vazão (m^3/s): retirada (q_r) e consumida (q_c)
Quantidade de água - criação de animais (C_{ca})	IBGE	2016	$C_{ca} = 22 n_T$; onde n_T é o número total de animais, assumindo-se o consumo unitário de 22 L dia ⁻¹ animal ⁻¹
Irrigação	SIDRA	2006	Número de estabelecimentos

A estimativa da quantidade de água consumida pelos bovinos e bubalinos (animais que foram considerados neste estudo - dados disponíveis no IBGE para o ano de 2016) foi calculada a partir do método apresentado por Palhares (2013), que utilizou em seus estudos a Tabela 2.3 como referência, para calcular a quantidade de água consumida. Para a avaliação proposta foi utilizado o consumo dos bovinos de corte até 250 kg com o menor consumo de água (22 L dia⁻¹ animal⁻¹), para não se ter uma supervalorização, uma vez que se trata de uma estimativa. De posse dessa informação calculou-se a estimativa de água fazendo a multiplicação da quantidade total entre bovinos e bubalinos de cada município e a quantidade de água consumida por dia.

Tabela 2.3 - Consumo de água por espécie em L dia⁻¹ animal⁻¹.

Bovinos de corte	Consumo	Aves de corte	Consumo
Até 250 kg ¹	22-27	Frangos e Frangas	0,190-0,270
Até 370 kg ¹	30-50	Poedeiras	0,250
Até 4550 kg ¹	41-78	Suíños	Consumo
Bovinos de leite	Consumo	Até 55 dias de idade	2,5
Vaca em lactação	64	De 56 a 95 dias de idade	5-10
Vaca e Novilha no final da gestação	51	De 96 a 156 dias de idade	5-12
Vaca seca e Novilha gestante	45	Fêmeas em gestação	5-20
Bezerro lactante (a pasto)	12	Fêmeas em lactação	15-30
		Machos	10-20

Fonte: Palhares (2013).

O consumo de água pela indústria foi obtido segundo o informado pela ANA (Agência Nacional de Água) para o ano de 2017, e apresentado na forma de vazão (m³/s) retirada (água captada diretamente em corpos hídricos superficiais e subterrâneos) e consumida (fração da água que não retorna ao corpo hídrico ou ao tratamento de efluentes). Alguns municípios não foram considerados devido a falha de dados.

Os dados de água consumida pela população nos municípios foram retirados do SNIS (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento), disponível no site do Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Os dados do SNIS para a componente Água e Esgotos agrupam-se segundo três bases: dados agregados, dados desagregados e dados municipais. Para esta pesquisa utilizou-se os dados desagregados que se aplicam aos prestadores de serviços de abrangência regional e microrregional. Ela contém as informações preenchidas pelos prestadores de serviços em formulários específicos para dados desagregados, e corresponde ao valor individual de cada campo, para cada município atendido.

Ainda sobre a água consumida pela população, algumas informações como: volume faturado, volume perdido e consumo médio foram calculados pelos autores. Para

o cálculo percentual do volume perdido subtraiu-se o valor do volume de água gerado pelo volume de água consumido.

O valor do consumo médio (m^3 /dia) foi calculado da seguinte forma: multiplicou-se o valor da população total atendida com o valor do abastecimento de água pelo consumo médio *per capita* de água (l/hab.dia) e dividiu-se o resultado por 1000. O ano de referência é o de 2017 na maioria dos municípios, porém como alguns não possuíam dados neste ano optou-se por utilizar o ano com dado disponível naquele município. Por exemplo, os dados de consumo médio *per capita* e volume consumido dos municípios de Nova Ubiratã e Planalto da Serra são do ano de 2007. A bacia é composta por 74 municípios, porém para este estudo a quantidade de municípios é de 68, devido a indisponibilidade de dados nos seguintes municípios: Itaituba, Placas, Aveiro e Santarém (localizados no estado do Pará) e Itanhagá e Nobre (no Mato Grosso).

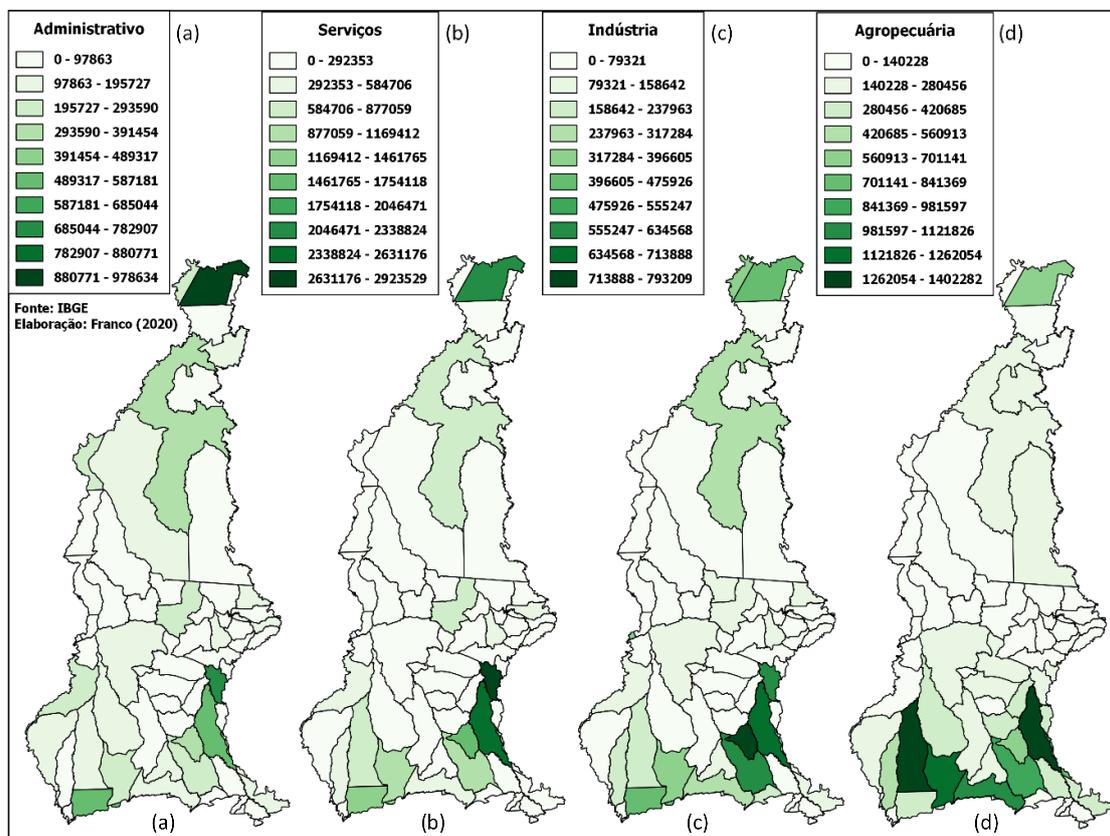
Quanto ao uso da água para a geração de energia elétrica, foi consultado o BIG (Banco de Informações de Geração) vinculado a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Na bacia do rio Tapajós são encontradas as seguintes categorias: Usina Hidrelétrica (UHE), Usina Termelétrica (UTE), Pequena Central Hidrelétrica (PCH) e Central Geradora Hidrelétrica (CGH). No BIG está disponível o nome da usina, data de operação, potência, destino da energia, os proprietários e os municípios onde estão localizadas as usinas.

2.3 Resultados

A Figura 2.3 apresenta o PIB (Unidade: R\$ (reais) multiplicado por 1000) vinculado as atividades econômicas (Administrativo, Serviços, Indústria e Agropecuária), observam-se como municípios de destaque nas categorias: (a) administrativa - Santarém e Itaituba (a norte da bacia - PA), Vale de São Domingos, Sinop e Sorriso (a sul da bacia - MT); (b) serviços - Sinop e Sorriso (MT) e Santarém (PA); (c) Indústria: Santarém, Juruti e Itaituba (PA) e Sorriso, Nova Mutum e Lucas do rio Verde (MT); (d) agropecuária: Santarém (PA) e Sapezal, Campo Novo do Parecis, Nova Mutum e Sorriso (MT). No geral, nota-se que os valores mais elevados do PIB estão nos municípios localizados na porção sul da bacia, com exceção do PIB da atividade Administrativo, no

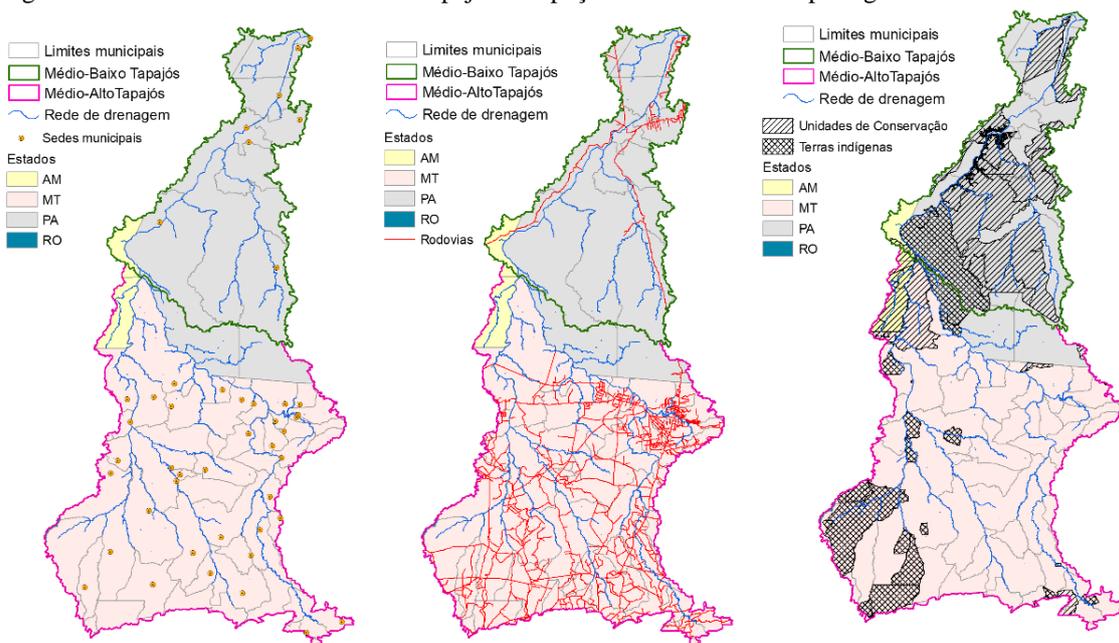
qual o valor mais elevado está no município de Santarém; sendo os de maior valor os de Serviços e Agropecuária.

Figura 2.3 - Produto Interno Bruto (PIB) das atividades econômicas desenvolvidas nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós.



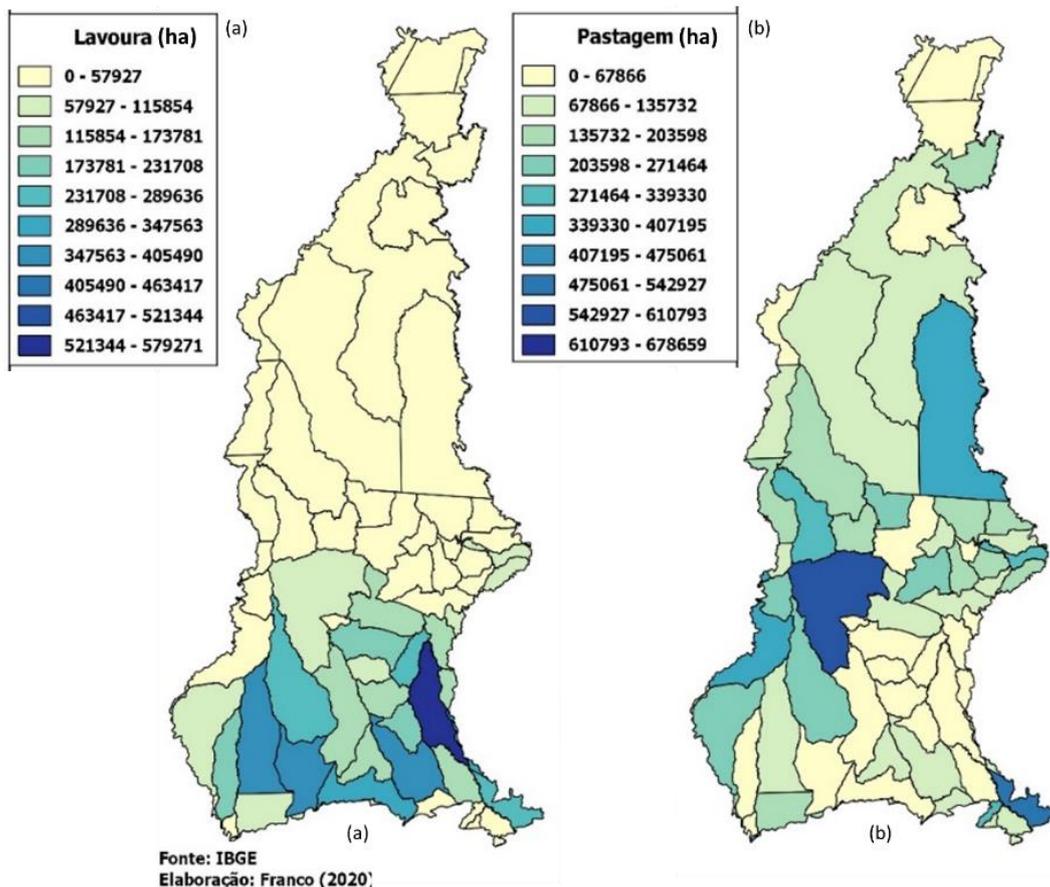
Observa-se na Figura 2.4, a forte diferença quanto a densidade de municípios, de vias de acesso e distribuição de áreas protegidas nos segmentos que mais caracterizam o estado do Pará (Médio-Baixo curso) e o do Mato Grosso (Médio-Alto curso). Esta divisão geográfica já demonstra seus efeitos na distribuição do PIB dos municípios, deixando um Pará mais “pobre” e um Mato Grosso “mais rico” o que amplia os conflitos não somente relativos à água, mas principalmente ao uso do território e dos recursos florestais.

Figura 2.4 - Contextos da bacia do rio Tapajós: ocupação territorial e áreas protegidas.



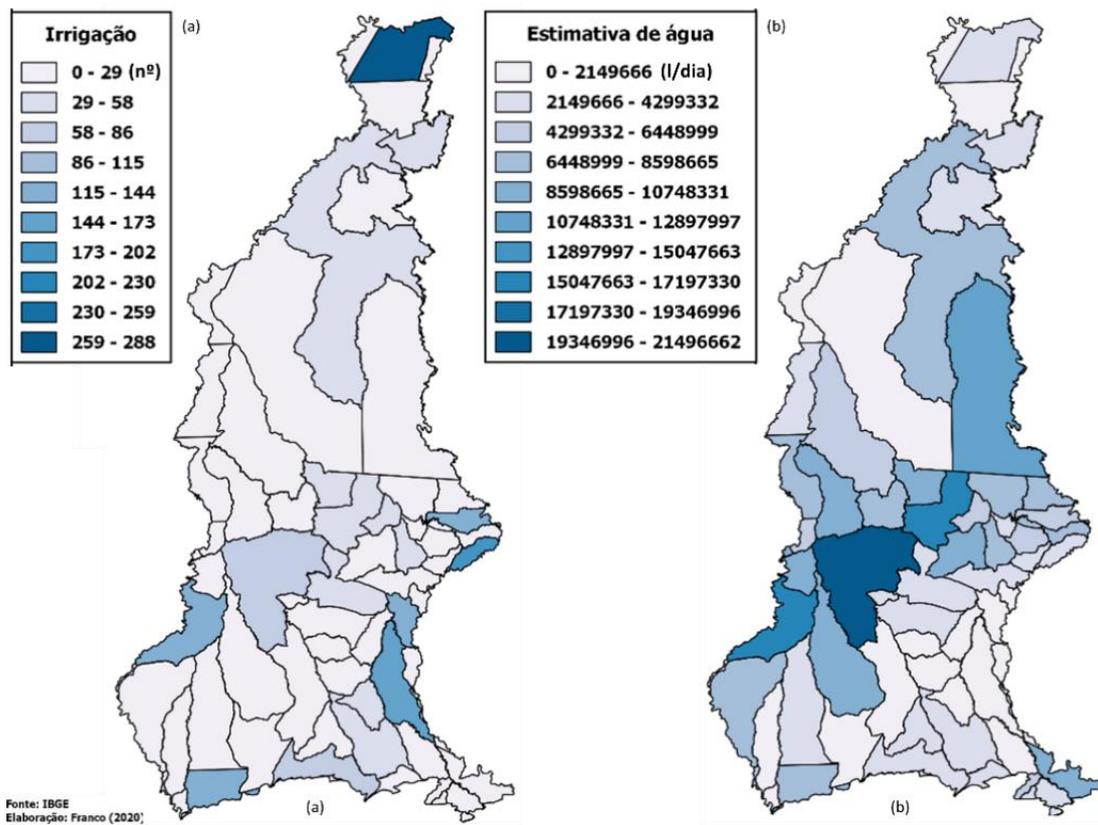
A Figura 2.5 ilustra a extensão, em hectare, que cada município utiliza para lavoura e pastagem. Nota-se o destaque para a produção agrícola do MT, que concentra as maiores extensões nos municípios da porção sudeste da bacia, com destaque para o município de Sorriso (aproximadamente 580 mil de hectares), seguido por Sapezal, com aproximadamente 370 mil de hectares. Quanto a pastagem, percebe-se que as maiores extensões estão nos municípios de Juara (MT), Paranatinga (MT), Juína (MT) e Novo Progresso (PA). Analisando as duas atividades (lavoura e pastagem) nota-se que a lavoura é praticada em maior extensão no sul da bacia e a pastagem tem maiores extensões nos municípios da região central da bacia. Outro fator que merece destaque, é a presença de unidades de conservação e terras indígenas no Estado do Pará, que acaba limitando a presença de grandes extensões em área agrícola, porém, mesmo com as restrições, estas ocorrem vinculadas a práticas intensivas de desmatamento. A grande diferença percentual entre os estados do PA e do MT em termos de áreas protegidas, explica o maior aproveitamento no MT, estando de acordo com o observado no PIB.

Figura 2.5 - Área (ha) dedicadas a lavoura (a) e a pastagem (b) nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós.



Quanto a irrigação (Figura 2.6) observa-se que o município que tem maior quantidade de estabelecimentos é Santarém (PA), com o máximo de 288. Os demais municípios, pertencentes ao estado do MT, com números considerados, são: Marcelândia (183), Sorriso (154), Juína (142) e Matupá (129). Em relação a quantidade de água consumida pela criação de animais, em especial a pecuária, destaca-se Juara, Alta Floresta e Juína (MT) e Novo Progresso (PA), que tem parte de seu território destinado para unidades de conservação.

Figura 2.6 - Número de estabelecimentos que utilizam a irrigação (a) e a quantidade de água consumida pela pecuária (b) nos municípios localizados na bacia do rio Tapajós. Unidade: litros por dia.



A distribuição espacial obtida, foi concordante com o PIB da agropecuária, que potencializa o Mato Grosso, que compõe o Médio-Alto Tapajós como área de maior concentração da atividade.

O consumo de água para abastecimento humano, apresentado na Tabela 2.4, indica que a quantidade de população atendida é bem inferior a população total do município.

Tabela 2.4 - Água consumida pela população nos municípios que compõe a bacia do rio Tapajós. Em destaque (*) aqueles que apresentam a sede municipal contida na bacia.

(continua)

Município	Estado	Ano Referência	População Total	Pop total atendida com abastecimento de água	Volume de água produzido m ³ /ano	Volume de água consumido m ³ /ano	Volume Faturado %	Volume Perdido %	Consumo médio per capita de água (l/hab.dia)	Consumo médio (m ³ /dia)
Altamira	PA	2017	111.435	37.108	6.307,20	6.307,20	100,00	0,00	465,67	17.280,08
Belterra*	PA	2017	17.249	7,5	454,00	454,00	100,00	0,00	165,84	1,24
Jacareacanga*	PA	2017	8.059	4.200	320,00	222,00	99,02	0,98	144,81	0,60
Juruti	PA	2014	52.755	30.000	1.530,00	1.530,00	100,00	0,00	139,73	4,1919
Mojú dos Campos	PA	2017	15.646	2.400	860,00	860,00	100,00	0,00	223,76	0,53
Novo Progresso*	PA	2017	25.071	19.418	1.364,82	724,29	93,59	6,41	106,63	2.070,54
Rurópolis*	PA	2016	47.971	30.000	1.400,00	1.400,00	100,00	0,00	94,23	2,83
Trairão*	PA	2015	18.084	3,6	108,00	108,00	100,00	0,00	82,19	0,29
Alta Floresta*	MT	2017	50.189	43.609	3.153,00	2.177,00	90,24	9,76	136,92	5.970,94
Apiacás*	MT	2017	9.694	4.500	211	209	99,98	0,02	127,25	572,62
Aripuanã	MT	2017	21.357	12.130	1390,65	639	92,48	7,52	144,36	1.751,08
Brasnorte*	MT	2017	18.688	12.190	680	650	99,70	0,30	149,02	1.816,55
Campo Novo do Parecis*	MT	2018	34.558	34.558	5.820,00	3.240,00	74,20	25,80	256,86	8.876,56
Campos de Júlio*	MT	2017	6.512	5.072	1.500,00	1.500,00	100,00	0,00	54,76	277,74
Carlinda*	MT	2017	10.136	5.786	359,07	243,18	98,84	1,16	114,06	659,95
Castanheira*	MT	2015	8.405	8.379	432	380	99,48	0,52	124,25	1.041,09
Cláudia	MT	2017	11.716	9.568	678,89	451,99	97,73	2,27	128,9	1.233,31
Colíder*	MT	2017	32.298	26.376	1.894,00	1.203,00	93,09	6,91	125,58	3.312,29
Colniza	MT	2017	36.161	10.800	715	695	99,80	0,20	176,31	1.904,15
Comodoro	MT	2017	19.932	25.518	855	648	97,93	2,07	129,43	3.302,79
Conquista D'Oeste	MT	2017	3.860	2.970	195	164	99,69	0,31	151,28	449,30
Cotriguaçu*	MT	2017	18.689	600	54	54	100,00	0,00	246,58	147,94
Diamantino	MT	2017	21.294	17.900	1.827,81	935,62	91,08	8,92	142,29	2.546,99
Guarantã do Norte*	MT	2017	34.500	25.637	1.608,1	1.230,51	96,22	3,78	131,46	3.370,24
Ipiranga do Norte	MT	2017	7.171	4.682	419	354	99,35	0,65	207,15	969,87

(continuação)

Município	Estado	Ano Referência	População Total	Pop total atendida com abastecimento de água	Volume de água produzido m³/ano	Volume de água consumido m³/ano	Volume Faturado %	Volume Perdido %	Consumo médio per capita de água (l/hab.dia)	Consumo médio (m³/dia)
Itanhangá	MT	2017	6.396	5.500	1.000,00	700	97,00	3,00	365,3	2.009,15
Itaúba*	MT	2017	3.800	3.800	357,7	357,7	100,00	0,00	275,24	1.045,91
Juara*	MT	2017	33.851	28.840	1.936,00	1.538,00	96,02	3,98	151,56	4.370,99
Juína*	MT	2017	39.779	33.815	2.419,00	2.319,00	99,00	1,00	191,48	6.474,89
Juruena*	MT	2017	14.913	8.248	923	876	99,53	0,47	292,58	2.413,19
Lucas do Rio Verde*	MT	2017	61.515	53.436	3.368,21	3.368,21	100,00	0,00	171,97	9.189,38
Marcelândia	MT	2017	10.422	9.366	740,28	564,49	98,24	1,76	165,72	1.552,13
Matupá*	MT	2017	15.870	14.475	1.222,79	735,93	95,13	4,87	140,92	2.039,81
Nortelândia	MT	2017	5.895	5.822	484,25	303,01	98,19	1,81	142,59	830,15
Nova Bandeirantes*	MT	2017	14.473	9.300	420	380	99,60	0,40	111,95	1.041,13
Nova Brasilândia	MT	2017	3.827	3.827	190,6	123,6	99,33	0,67	87,3	334,09
Nova Canaã do Norte*	MT	2017	12.388	12.388	643	476	98,33	1,67	105,41	1.305,81
Nova Guarita*	MT	2017	4.457	3.025	220	214	99,94	0,06	193,59	585,60
Nova Lacerda	MT	2017	6.338	3.522	611,8	142,08	95,30	4,70	110,52	389,25
Nova Marilândia	MT	2017	3.159	2.095	360	342	99,82	0,18	449,07	940,80
Nova Maringá*	MT	2017	8.182	5.290	684	684	100,00	0,00	366,01	1.936,19
Nova Monte Verde*	MT	2016	8.730	250	18,2	14,6	99,96	0,04	160	40
Nova Mutum*	MT	2017	42.607	42.607	3.627,5	2.422,07	87,95	12,05	158,4	6.748,94
Nova Santa Helena	MT	2017	3.596	2.296	394,2	109,89	97,16	2,84	119,57	274,53
Nova Ubiratã	MT	2009	8.372	6.900	920	689,2	97,69	2,31	273,7	1.888,53
Novo Horizonte do Norte*	MT	2017	3.876	2.379	249,13	224,23	99,75	0,25	258,23	614,32
Novo Mundo*	MT	2015	8.364	3.289	256	256	100,00	0,00	218,73	719,40
Paranaíta*	MT	2017	10.884	6.436	440,67	400,56	99,60	0,40	170,66	1.098,36
Paranatinga*	MT	2017	21.612	17.279	1.730,63	849,98	91,19	8,81	136,47	2.358,06

(conclusão)										
Município	Estado	Ano Referência	População Total	Pop total atendida com abastecimento de água	Volume de água produzido m ³ /ano	Volume de água consumido m ³ /ano	Volume Faturado %	Volume Perdido %	Consumo médio per capita de água (l/hab.dia)	Consumo médio (m ³ /dia)
Peixoto de Azevedo*	MT	2017	33.630	21.615	1.935,36	1.066,87	91,32	8,68	135,86	2.936,61
Planalto da Serra*	MT	2009	2.797	1.900	130	115	99,85	0,15	170,8	324,52
Pontes e Lacerda	MT	2017	43.832	36.806	2.604,00	1.741,00	91,37	8,63	130,23	4.793,24
Porto dos Gaúchos*	MT	2017	5.283	5.140	356,8	232,16	98,75	1,25	123,83	636,48
Primavera do Leste	MT	2017	59.293	59.293	4.231,54	3.131,11	89,00	11,00	145,81	8.645,51
Rosário Oeste	MT	2017	16.908	12.099	1.254,00	1.154,00	99,00	1,00	267,95	3.241,92
Santa Rita do Trivelato	MT	2017	3.231	1.773	286	285	99,99	0,01	447,08	792,67
São José do Rio Claro*	MT	2017	19.728	15.264	1.010,07	765,65	97,56	2,44	139,02	2.122,00
Sapezal*	MT	2017	24.305	21.259	1.736,05	1.662,00	99,26	0,74	218,38	4.642,54
Sinop*	MT	2017	135.874	135.874	1.2673,69	7.724,87	50,51	49,49	157,47	21.396,07
Sorriso*	MT	2017	85.223	85.223	6.879,68	4.790,26	79,11	20,89	156,22	13.313,53
Tabaporã*	MT	2017	9.309	9.000	1.800,00	785	89,85	10,15	245,93	2.213,37
Tangará da Serra	MT	2017	98.828	98.828	9.040,00	4.323,00	52,83	47,17	121,3	11.987,83
Tapurah*	MT	2017	12.967	10.334	1.100,00	900	98,00	2,00	244,35	2.525,11
Terra Nova do Norte*	MT	2017	9.606	9.606	868	849	99,81	0,19	239,53	2.300,92
Vera*	MT	2017	10.901	7.899	565,88	473,53	99,08	0,92	166,96	1.318,81

Fonte: Dados - SNIS (2020) e adaptados pelos autores.

É observada esta diferença em praticamente 69 municípios, com exceção de Campo Novo do Parecis, Itaúba, Nova Mutum, Primavera do Leste, Sinop, Sorriso, Tangará da Serra e Terra Nova do Norte, todos no MT. Nota-se que em alguns municípios, como é o caso de Belterra (PA), Campos de Júlio (MT), Cotriguaçu (MT), entre outros, o valor do volume de água produzido é igual ao volume de água consumido, porém, é conhecido que existem perdas de água (tubulação quebrada por exemplo), este informe é a não contabilização por parte dos gestores destes volumes. A realidade de muitos é semelhante à dos municípios de Campo Novo do Parecis (25%), Maués (35%),

Sinop (aproximadamente 50%) e Tangará da Serra (47%), onde em geral as perdas são elevadas.

A presença da sede municipal na bacia é relevante, pois nesta se concentra o consumo urbano, vinculado as redes de abastecimento. O setor rural é atendido na maioria dos casos ou por autoabastecimento ou por microssistemas locais, logo pouco ou não são contabilizadas suas informações no SNIS pelas prefeituras municipais ou pelo governo do estado.

No consumo médio (m^3/dia) nota-se que este é alto na maioria dos municípios, principalmente em Altamira (PA) e Sinop, Sorriso, Campo Novo do Parecis e Lucas do Rio Verde no MT. Este cenário é compatível com os demais mapeados em termos de população e PIB, por exemplo. Ao se observar uma distribuição dada pelo Quartil (admitindo somente aqueles com sede no interior da bacia), o maior percentual nos municípios paraenses é de cerca de $3 m^3/dia$, e no MT de $3370 m^3/dia$. Esta diferença dar-se pelo maior número de municípios componentes, nesta região que marca o Médio-Alto curso da bacia. Nota-se que há uma permanência de pressão em todas as avaliações realizadas neste setor, seja pela densidade de municípios, pela população residente ou pelo uso potencial da terra e dos recursos naturais.

A Tabela 2.5 apresenta as vazões de retiradas (de recursos hídricos superficiais e subterrâneo) e consumidas pela indústria (alimentos, derivados do petróleo e biocombustível, minerais não-metálicos, metal e madeira).

Mais uma vez nota-se a supremacia do maior consumo de água nos municípios do Estado do Mato Grosso, com destaque nas vazões de retirada, para produtos alimentícios, nos municípios de Lucas do Rio Verde (mais de 160 mil l/s), Nova Mutum (107 mil l/s) e Tangará da Serra (84 mil l/s) e no Estado do Pará o destaque é o município de Santarém.

Quanto a vazão de retirada dos produtos derivados de petróleo, os municípios com maior valor são Campo dos Parecis e São José do Rio Claro com 119 e 74 mil l/s, respectivamente, e com número de municípios bastante inferior à indústria de produtos alimentícios.

Tabela 2.5 - Vazões de retiradas e consumidas pela indústria.

(continua)

Municípios	Produtos alimentícios		Produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis		Produtos de minerais não-metálicos		Produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos		Produtos de madeira	
	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)
Altamira	4,047	0,686			0,091	0,0043	0,296	0,147	0,648	0,132
Itaituba	3,719	0,299			0,065	0,03	14,922	14,677	1,274	0,29
Novo Progresso	2,388	0,309			0,072	0,033	0,086	0,018	1,516	0,337
Rurópolis	0,086	0,011					0,813	0,796	0,457	0,091
Santarém	8,467	1,389			0,358	0,168	3,407	1,562	2,094	0,432
Alta Floresta	29,022	4,154	0,444	0,444	0,152	0,071	0,887	0,806	1,76	0,402
Aripuanã	0,03	0,007			0,004	0,002	0,01	0,002	2,62	0,576
Brasnorte	0,445	0,056			0,024	0,011	0,096	0,05	1,783	0,412
Campo Novo do Parecis	7,301	1,075	119,95	119,95	0,232	0,108	0,416	0,402	0,037	0,008
Carlinda	0,069	0,02			0,01	0,005	0,132	0,028	0,055	0,011
Castanheira	1,346	0,456					0,018	0,004	0,038	0,008
Cláudia	0,4	0,09			0,004	0,002	0,017	0,003	1,423	0,305
Colíder	21,49	3,139			0,042	0,019	0,4	0,142	0,084	0,021
Colniza	0,59	0,211			0,024	0,011	0,067	0,029	2,021	0,423
Comodoro	1,112	0,4			0,035	0,016	0,053	0,011	0,144	0,03
Diamantino	37,32	4,666			0,012	0,006	0,063	0,063		
Guarantã do Norte	13,253	1,733			0,163	0,076	0,21	0,139	0,689	0,172
Itanhangá	0,018	0,004			0,012	0,006	0,011	0,007	0,303	0,063
Itaúba	0,177	0,051			0,006	0,003	0,029	0,006	0,455	0,095
Juara	21,717	3,073			0,152	0,071	0,186	0,129	2,05	0,491
Juína	13,863	1,967			0,092	0,043	0,574	0,491	1,908	0,402
Juruena	1,275	0,377			0,004	0,002	0,015	0,003	0,792	0,159
Lucas do Rio Verde	160,841	20,588	18,659	18,659	0,658	0,308	1,997	1,021	0,041	0,008
Marcelândia	0,218	0,031					0,015	0,003	1,229	0,268
Matupá	24,559	3,079			0,002	0,001	0,217	0,181	0,164	0,041

(conclusão)

Municípios	Produtos alimentícios		Produtos derivados do petróleo e de biocombustíveis		Produtos de minerais não-metálicos		Produtos de metal, exceto máquinas e equipamentos		Produtos de madeira	
	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)	Vazões de retirada (l/s)	Vazões consumidas (l/s)
Nobres	0,117	0,015			0,081	0,038	7,611	6,285		
Nova Bandeirantes	0,184	0,064			0,012	0,005	0,013	0,003	0,396	0,079
Nova Canaã do Norte	12,615	2,217			0,015	0,007	0,035	0,017	0,044	0,009
Nova Marilândia	0,869	0,183	16,215	16,215	0,006	0,003				
Nova Mutum	107,872	13,007	10,218	10,218	0,544	0,254	0,526	0,45	0,021	0,005
Nova Ubiratã	0,063	0,013			0,004	0,002			0,324	0,065
Paranaíta					0,021	0,01	0,024	0,015	0,111	0,024
Paranatinga	30,751	3,851			0,046	0,021	0,036	0,013	0,006	0,001
Peixoto de Azevedo	0,069	0,019			0,035	0,016	0,066	0,014	0,003	0,001
Pontes e Lacerda	34,117	4,95			0,055	0,026	0,308	0,074	0,01	0,002
Porto dos Gaúchos	0,008	0,002			0,002	0,001	0,026	0,006	0,226	0,05
Primavera do Leste	17,727	1,486			0,274	0,128	1,387	1,186	0,041	0,009
São José do Rio Claro	0,116	0,023	74,636	74,636	0,035	0,017			0,932	0,192
Sapezal	0,755	0,121	0,444	0,444	0,05	0,023	0,164	0,144		
Sinop	30,614	4,673			0,765	0,358	3,779	1,681	4,372	0,928
Sorriso	45,991	4,905	4,665	4,665	0,697	0,326	1,805	1,579	0,728	0,161
Tabaporã	0,139	0,022			0,027	0,013	0,089	0,089	0,496	0,104
Tangará da Serra	84,752	11,385			0,431	0,202	1,416	0,881	0,086	0,022
Tapurah	0,587	0,169			0,008	0,004	0,025	0,025	0,333	0,068
Terra Nova do Norte	3,287	1,126					0,002		0,112	0,027
Vera	2,622	0,756			0,012	0,006	0,038	0,038	0,976	0,247

Fonte: ANA (2017).

A última variável analisada é referente ao aproveitamento para fins de energia elétrica (Tabela 2.6), que normalmente concorre com uma atividade presente na região

que é a navegação. Considerando a região como um todo, o aproveitamento energético data década de 70, tendo crescido desde então. A partir de 1980 mais 03 usinas foram instaladas, na década de 1990 foram 07 usinas e entre os anos de 2000 e 2009 foram 23 usinas. De 2010 até o atual foram mais 19 usinas instaladas na bacia do rio Tapajós, isso sem contar com as que não tem informação da data da operação.

Quanto à potência (KW) das usinas, observa-se que a usina de Teles Pires é que possui a maior potência (quase 2 milhões de KW), essa usina está instalada nos municípios de Paranaíta (MT) e Jacareacanga (PA). Em seguida vem a usina de Dardanelos, localizada no município de Aripuanã (MT) com aproximadamente 262 mil KW potência. A usina de Guaporé (Pontes e Lacerda – MT) tem potência de 120 mil KW. Observa-se ainda que as usinas com as maiores potências estão localizadas no estado do Mato Grosso. Em sua grande maioria, a utilização das usinas na bacia do rio Tapajós é destinada para a Produção Independente de Energia (PIE), e os tipos de usinas são as PCHs e UTEs.

Tabela 2.6 - Perfil do aproveitamento energético, segundo ANEEL (2020): UTE (Usina Termelétricas), PCH (Pequenas Centrais Hidrelétricas), UHE (Usina Hidrelétricas) e CGH (Central Geradora Hidrelétrica). Destino: SP (Serviço Público), PIE (Produção Independente de Energia), APE (Autoprodução de Energia) e REG (Registro).

(continua)

Usina	Tipo	Data Operação	Potência (kW)	Destino da Energia	Município
Apuí	UHE	01/10/1998	5.350	SP	Apuí - AM
Apuí - Powertech	UHE	-	6.175	PIE	Apuí - AM
Maués	CGH	01/03/1983	9.680	SP	Maués - AM
Maués - COE	UTE	20/12/2019	30.388	PIE	Maués - AM
Brigadeiro Velloso III	PCH	30/11/2010	2.000	REG	Novo Progresso - PA
Salto Três de Maio	PCH	13/01/2010	20.000	PIE	Altamira - PA
Cachoeira do Aruã	PCH	-	50	REG	Santarém - PA
Caima	CGH	30/05/2005	4.920	REG	Itaituba - PA
Curuá-Una	PCH	01/01/1977	42.800	SP	Santarém - PA

Fordlândia	CGH	-	960	REG	Aveiro - PA
Jacareacanga – CEPA	UTE	04/02/2017	3.200	PIE	Jacareacanga - PA

(continuação)

Usina	Tipo	Data Operação	Potência (kW)	Destino da Energia	Município
Juruti – CEPA	CGH	02/02/2017	21.630	PIE	Juruti - PA
Novo Progresso	UTE	01/04/2005	9.125	SP	Novo Progresso - PA
Salto Buriti	PCH	18/12/2008	10.000	PIE	Novo Progresso - PA
Teles Pires	PCH	07/11/2015	1.819.800	PIE	Jacareacanga - PA
Aripuanã	UHE	-	800	SP	Aripuanã - MT
ARS	UHE	07/08/2009	6.660	PIE	Nova Ubiratã - MT
Barralcool	PCH	01/10/2002	30.000	PIE	Barra do Bugres - MT
Bocaiúva	UTE	24/06/2010	30.000	PIE	Brasnorte - MT
Braço Norte	PCH	-	5.180	PIE	Guarantã do Norte - MT
Braço Norte II	PCH	-	15.100	SP	Guarantã do Norte - MT
Braço Norte III	PCH	03/10/2003	14.160	PIE	Guarantã do Norte – MT, Novo Mundo - MT
Braço Norte IV	PCH	08/11/2007	14.000	PIE	Guarantã do Norte – MT, Novo Mundo - MT
Buriti	CGH	04/08/2018	10.000	PIE	Sapezal - MT
Cabeça de Boi	PCH	05/11/2016	30.000	PIE	Alta Floresta – MT, Nova Monte Verde - MT
Cabixi II	PCH	12/08/2002	2.800	APE	Comodoro - MT
Canoa Quebrada	UTE	13/12/2006	28.000	PIE	Lucas do Rio Verde - MT, Sorriso - MT
Cidezal	UTE	25/06/2011	17.000	PIE	Campos de Júlio - MT, Sapezal - MT
Conrado Heitor/Kamamultda	PCH	16/02/1998	800	REG	Conquista D'Oeste - MT
Coprodia	UTE	05/08/1994	27.200	APE	Campo Novo do Parecis - MT
Corredeira do Noronha	UTE	-	340	REG	Paranatinga - MT
Córrego Santa Cruz	UTE	30/10/2010	1.000,00	REG	Brasnorte - MT
Culuene	CGT	-	1.790	PIE	Paranatinga - M, Primavera do Leste - MT

Da Fazenda	PCH	22/09/201 6	27.000	PIE	Alta Floresta – MT, Nova Monte Verde - MT
Dardanelos	UTE	09/08/201 1	261.000	PIE	Aripuanã - MT
Divisa	PCH	09/11/201 1	10.800	PIE	Campos de Júlio - MT
Egídio	CGH	01/08/199 7	2.000	REG	Juruena - MT

(continuação)

Usina	Tipo	Data Operação	Potência (kW)	Destino da Energia	Município
Faxinal II	UTE	22/11/2005	30.000	PIE	Aripuanã - MT
Faxinal II	PCH	22/11/2005	30.000	PIE	Aripuanã - MT
Fazenda São José	PCH	-	120	REG	Rosário Oeste - MT
Fazenda São Jose I	PCH	01/01/1983	249,6	REG	Sorriso - MT
Garganta da Jararaca	CGH	28/11/2006	29.300	PIE	Campo Novo do Parecis - MT
Graça Brennand (Antiga Terra Santa)	UHE	28/06/2008	27.400	PIE	Barra do Bugres – MT, Tangará da Serra - MT
Guaporé	PCH	08/04/2003	120.000	APE PIE	Pontes e Lacerda - MT
Guariba	UHE	31/10/2005	1.448	REG	Colniza - MT
Ilha Comprida	PCH	04/07/2013	20.160	PIE	Campos de Júlio – MT, Sapezal - MT
Jesuíta	PCH	-	22.300	PIE	Campos de Júlio – MT, Sapezal - MT
Juína	PCH	-	5.300	SP	Juína - MT
Mercedes I e II	PCH	01/01/2002	153,6	REG	Tabaporã - MT
Nhandu	UHE	-	13.000	PIE	Novo Mundo - MT
Nova Bandeirantes	PCH	22/09/1997	3.597	REG	Nova Bandeirantes - MT
Nova Guaporé	UTE	-	14.000	PIE	Pontes e Lacerda - MT
Nova Maringá	PCH	01/07/2003	2.683	REG	Nova Maringá - MT
Nova Monte Verde	PCH	01/06/2001	2.502	REG	Nova Monte Verde - MT
Pampeana	UTE	14/05/2009	28.000	PIE	Barra do Bugres – MT, Tangará da Serra - MT
Pantanal	CGH	18/04/2000	5.000	REG	Jaciara - MT
Paranorte	PCH	-	997,6	REG	Juara – MT, Nova Bandeirantes - MT
Paranorte	UTE	01/12/2005	984	REG	Juara - MT
Rio Margarida 2	UTE	20/05/1995	395,25	REG	Comodoro - MT
Rio Prata	UTE	30/09/1994	2.135	PIE	Comodoro - MT
Rochedo	PCH	-	9.000	PIE	Novo Mundo - MT
Rondon	UTE	06/08/2011	13.000	PIE	Campos de Júlio – MT, Sapezal - MT
Sacre 2	CGH	14/09/2006	30.000	PIE	Brasnorte - MT
Salto Apiacás	PCH	17/09/2016	45.000	PIE	Alta Floresta - MT

(conclusão)

Usina	Tipo	Data Operação	Potência (kW)	Destino da Energia	Município
Salto Corgão	PCH	29/06/2005	27.000	PIE	Nova Lacerda - MT
Santa Lúcia	PCH	-	5.000	PIE	Sapezal - MT
Santa Lúcia II	PCH	14/04/2003	7.600	PIE	Sapezal - MT
Santana I	PCH	26/04/2012	14.758	PIE	Nortelândia - MT
Segredo	PCH	25/04/2013	26.118	PIE	Campos de Júlio - MT, Sapezal - MT
Teles Pires	PCH	07/11/2015	1.819.800	PIE	Paranaíta - MT
Tucunaré	CGH	01/01/1987	220	REG	Sapezal - MT

Fonte: ANEEL (2020).

2.4 Discussões

A bacia do Tapajós é considerada, na bacia amazônica, como uma das bacias com maior desenvolvimento econômico da região em função dos investimentos principalmente na área do agronegócio que, nas últimas décadas, vem impulsionando em um aumento na economia e na degradação da floresta (CUARESMA, 2017). Como consequência desse aumento está o uso demasiado dos recursos hídricos.

Nos resultados apresentados no estudo do PIB, os municípios localizados na porção sul da bacia, possuem maior PIB nas atividades Serviços e Agropecuário, com exceção da atividade Administrativo, no qual o valor mais elevado está no município de Santarém.

De acordo com Vieira, Santos Junior e Toledo (2014) a busca por produtividade iniciada a partir de 1970, na Amazônia, foi responsável pelo desenvolvimento de estratégias que estabeleceram um modelo de desenvolvimento rural extremamente agressivo ao ambiente, marcado pela expansão agropecuária e mineração (CUARESMA, 2017). Nascimento et al. (2015) reforçam a primazia da pecuária na região amazônica, principalmente no Pará (Sul do estado) e Mato Grosso. Destaca-se que a região de maior

pressão pelo fator PIB são as cabeceiras e a foz (coincidente com o eixo da BR 163), que configuram elementos estratégicos para a questão hídrica da bacia.

É fato que a densidade de municípios, conseqüentemente populacional, é maior no sul da bacia como já discutido por Carvalho e Domingues (2016) e Palheta et al. (2017), acirrando as discussões sobre a utilidade e eficiência das unidades de conservação, dimensão e aproveitamento das terras indígenas. Outro fator anteriormente abordado e que tem relação com este quadro é a divisão do estado do Pará, onde os municípios da região ocidental se sentem isolados do restante do estado e com menores condições de crescimento econômico, este contexto é influenciado pela comparação com o desenvolvimento obtido pelo norte de Mato Grosso, potencialmente agrícola (WEIHS; SAYAGO; TOURRAND, 2017).

Observou-se que a lavoura é praticada em maior extensão no sul da bacia e a pastagem tem maiores extensões nos municípios da região central da bacia, em consequência do bom desempenho do agronegócio no estado do MT. O desmatamento na Amazônia é consequência da expansão imposta sobre a região desde a década de 1970 para projetos de expansão agrícola e pecuária, em que houve a remoção temporária ou parcial da floresta para a sua conversão em áreas de pastos e agrícolas associadas com a extração seletiva de madeira (LE TOURNEAU, 2016).

De acordo com as informações de Domingues e Bermann (2012) e SONG et al. (2021), mais de um milhão de hectares de florestas foram convertidos em campos de soja na Amazônia até 2005, mesmo com estudos que apontam que a fragilidade do solo da região não sustenta mais que três anos de produção de soja e alertam para uma possível contaminação de lençóis freáticos por agrotóxicos.

Quanto a quantidade de estabelecimentos de irrigação localizados na bacia, notou-se que o município de Santarém (PA) detém a maior quantidade, seguido de alguns municípios do MT (COELHO et al., 2021).

De acordo com o relatório pleno de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, no país se retiram, em média, 2.057,8 m³/s de rios, córregos, lagoas, lagos e reservatórios;

sendo que 46,2% vão para irrigação, sendo o valor equivalente para criação de animais, ainda calculado em função do número de indivíduos, uma vez que as formas que os criadores usam são diversificadas e alternam sistemas superficiais e subterrâneos (ANA, 2017).

O resultado dos estabelecimentos de irrigação concordou com o PIB da agropecuária na bacia, que apesar do município de Santarém (PA) apresentar o valor mais expressivo, os municípios do Estado do Mato Grosso demandam de maior concentração da atividade da agropecuária.

Diferente do que ocorre no estado do PA, Pereira e Mendes (2002), reforçam que no MT houve a implantação do *agribusiness*, onde a agroindústria se vincula fortemente com o setor primário, com a formação de segmentos de complexos agroindustriais. Recompensa Joseph et al. (2011) ao realizarem um enfoque no município de Sorriso (MT), que se destaca nos cenários mapeados, afirmam que todo o progresso obtido com o crescimento do setor agropecuário na região, não se reproduz nos contextos social e ambiental, precisando ser reavaliado para responder a estes setores.

Logo, sobre o segmento bacia hidrográfica, o setor produtivo intensifica suas ações nas bacias hidrográficas que compõe o Médio-Alto Tapajós e que formam sua principal região de recarga. A expansão nestas áreas do consumo de água ou da pressão do desmatamento sobre as regiões mais vulneráveis já foi abordado por Rozon et al. (2015) e Carvalho e Domingues (2016), indicando as possíveis consequências tanto na região, quanto no volume total de água da bacia hidrográfica, tornando seus afluentes cada vez mais dependentes do sistema de precipitação e da manutenção das áreas protegidas no Médio-Baixo curso no estado do PA.

Quanto ao consumo de água, o maior percentual está no MT com 3370 m³/dia em decorrência do maior número de municípios componentes, população residente e uso potencial da terra e dos recursos naturais neste Estado, gerando assim uma permanência de pressão em todas as avaliações realizadas neste setor.

O confronto entre o crescimento das cidades e a gestão de recursos hídricos tem sido um obstáculo a manutenção dos padrões de qualidade ambiental das cidades, principalmente pelos problemas vinculados ao saneamento básico, incluindo a questão “esgoto-água-lixo” (SENNA; MAIA; MEDEIROS, 2019), um exemplo disso são as perdas nas redes de distribuição de água em São Paulo por exemplo, que em 2001,

situavam em 30% de toda a água para a distribuída. Fenzl et al. (2010) relatam que uma das perdas de água no estado do Pará está relacionada a fatores estrutural, ou seja, tubulações antigas, muitas ainda do início do século passado, com vazamentos conhecidos e ocultos de difícil detecção, além das dificuldades correntes de manutenção dessas tubulações. Para Santos (2007) as perdas físicas representam a parcela não consumida da água produzida pelo sistema, que se originam sobretudo, de vazamentos no sistema, os quais envolvem operações realizadas nas fases de captação, adução de água bruta, tratamento, reservação, adução de água tratada e principalmente a distribuição.

Outra forma do consumo hídrico, na bacia do Tapajós, é o uso da água pela indústria, em que os resultados mostraram que a indústria está presente na maioria dos municípios do MT, com valor expressivo na indústria de produtos alimentícios.

De acordo com a ANA (2017) na estimativa nacional de usos consuntivos da água, a indústria de transformação representa o terceiro maior uso, atrás do abastecimento urbano e da agricultura irrigada. Apesar da grande variabilidade dos valores, mantém-se a diferença entre os municípios localizados no PA e no MT, sendo a captação no rio Tapajós restrita ao PA; no MT ocorrem nas bacias afluentes, e na maior parte não monitorados.

O potencial industrial de porte da região é vinculado ao agronegócio (NEPSTAD et al., 2008), com algum destaque aos biocombustíveis. Porém, é importante avaliar que existe o aproveitamento da água superficial e da água subterrânea, esta última por vezes não é contabilizada pelos dados oficiais que são dependentes da outorga de direito de uso da água, requerida pelo empreendedor a ANA ou ao órgão estadual.

Para Costa (2010) existe uma tendência crescente dos mercados de consumo para os produtos gerados na região Amazônica, florestais em particular e, especialmente, para aqueles oriundos da chamada biodiversidade amazônica; isto acrescido ao potencial mineral. Para Palheta et al. (2017) a atividade mineradora é capaz de gerar recursos diretos, relativos à extração do minério, e indiretos, vinculados a industrialização, circulação, atração populacional e dinamização da economia regional; o que agrega o valor de consumo da água pela atividade em si e pelos fatores indiretos vinculados.

Quanto aos resultados da quantidade de usinas instaladas na bacia do rio Tapajós observou-se uma quantidade expressiva e que ainda existem 94 em projeto no estado do Mato Grosso (ANEEL, 2015). Fearnside (2015b) e Lees et al. (2016) expunham, em seu estudo, a construção de uma grande quantidade de usinas hidrelétricas nos rios que compõem a bacia do Tapajós, como é o caso do Jamanxim, Teles Pires e Juruena. O autor deixa claro que tais construções traz uma série de problemas socioambientais devido a inundação de grandes áreas (FEARNSIDE, 2015a). De acordo com Tolmasquim (2012) deverão ser viabilizados cerca de 19 GW em projetos hidrelétricos (entre 2016-2020), desse total, 82% (15,5 GW), estarão situados na Região Norte do Brasil, na qual a região da bacia do Tapajós estará em destaque com a hidrelétrica de São Luiz do Tapajós, com capacidade instalada na ordem de 7.000 MW (FARIA et al., 2017; WALKER et al., 2019).

Hernandez (2012) apresenta que os projetos propostos nos rios Tapajós e Jamanxim, são quase todos associados a usina do tipo fio d'água, com pouca capacidade de regularização, com várias delas apresentando superposição com unidades de conservação; seguindo um padrão associado aos projetos em execução nos rios Madeira e Xingu, onde não existem reservatórios com grande regularização do fluxo de água. O grande questionamento que sempre ocorre é a resposta deste para a região em termos de desenvolvimento econômico e impacto ambiental.

A bacia do rio Tapajós mostrou por este conjunto de cenários que tende a concentrar todo o seu potencial de uso da água no Médio-Alto Curso, estando a menor pressão em direção ao baixo curso, que apenas vai se intensificar próximo a foz. Os usos das águas têm uma resposta direta nos municípios envolvidos, porém a avaliação integrada destes na bacia, precisa de uma validação quantitativa, que o nível de informação fornecida pelas bases oficiais não consegue refletir, tanto pela defasagem temporal, quanto pela limitação espacial da informação, normalmente concentrada em torno das sedes municipais.

Amin (2015) destaca o contexto geopolítico da Amazônia, que traduz o observado para a bacia do rio Tapajós a partir da avaliação do uso múltiplo de suas águas, onde ocorre a influência do cenário internacional, dado o estoque de recursos estratégicos; uma dinâmica de mercado definida como “a mercantilização da natureza”; e a consequente

pressão global pela disponibilidade de recursos naturais estratégicos, o que exige iniciativas administrativas e políticas pelos governos estaduais e municipais envolvidos e a articulação do governo federal para formação do Comitê de Bacia Hidrográfica do Tapajós, uma vez que a bacia já demonstra ter uma complexidade de formas de uso das águas que responde a necessidade da formação de organismos locais que facilitem o diálogo e a gestão do recurso.

2.5 Conclusões

A bacia do rio Tapajós demonstra uma diversidade de usos da água, que podem ser compartimentados em dois segmentos distintos, cujos contextos são derivados de políticas administrativas diferenciais, a saber: O Alto-Médio curso associado ao estado do Mato Grosso com uma forte tendência voltada ao agronegócio e o Baixo-Médio curso, no estado do Pará, de características conservacionistas.

As consequências sobre os recursos hídricos destas diferenças ainda não são conhecidas pela falta de monitoramento nos rios afluentes e principalmente pela baixa informação relativa ao consumo de água, onde mesmo as disponibilizadas pelos gestores públicos, apresentam problemas associados aos fatores temporais (defasadas) ou de confiabilidade do registro.

Desta forma, o balanço demanda x disponibilidade precisa ter um acompanhamento temporal e espacial na bacia por parte de estados e municípios, reforçando-se a necessidade de se instituir ou fortalecer instrumentos de regulação das águas, de forma a garantir os aspectos quantitativos e qualitativos adequados para o atendimento voltado ao abastecimento humano e demandas econômicas.

REFERÊNCIAS

AMIN, M. M. A Amazônia na geopolítica mundial dos recursos estratégicos do século XXI. **Revista Crítica de Ciências Sociais**, n. 107, p. 17-38, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos**. Brasília, DF, 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Series históricas**. Brasília,DF. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 13 de janeiro de 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. **PCHs do estado do Mato Grosso**. PCHs do estado do Mato Grosso. Brasília,DF: ANEEL, 2015. 64p.

BANCO DE INFORMAÇÕES DE GERAÇÃO-BIG. **Uso da água para a geração de energia elétrica**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/UsinaListaSelecao.asp>. Acesso em: 03 de março de 2020.

ASSIS, W. D.; RIBEIRO, M. M. R.; MORAES, M. M. G. A. Proposição de melhorias para o Sistema de Cobrança pelo Uso da Água Bruta da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 4. 2018.

CAMARA, M.; JAMIL, N. R.; ABDULLAH, A. F. B. Impact of land uses on water quality in Malaysia: a review. **Ecological Processes**, Califórnia, v. 8, n. 1, p. 10. 2019.

CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal brasileira entre 2006 e 2030. **Nova Economia**, Minas Gerais, v. 26, n. 2, p. 585-621, 2016.

COSTA JUNIOR, J. M. F.; SILVA, C. I. M.; LIMA, A. A. S.; RODRIGUES JÚNIOR, D.; SILVEIRA, L. C. L.; SOUZA, G. S.; PINHEIRO, M. C. N. Teores de mercúrio em cabelo e consumo de pescado de comunidades ribeirinhas na Amazônia brasileira, região do Tapajós. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 3, p. 805 – 812, 2018.

COSTA, W. M. Arranjos comunitários, sistemas produtivos e aportes de ciência e tecnologia no uso da terra e de recursos florestais na Amazônia. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Humanas, Belém, v. 5, n. 1, p. 41-57, 2010.

COUTINHO, E. C.; ROCHA, E. J. P.; LIMA, A. M. M.; RIBEIRO, H. M. C.; GUTIERREZ, L. A. C. L.; BARBOSA, A. J. S.; PAES, GL. K. A. A.; BISPO, C. J. C.; TAVARES, P. A. 2013. Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 12, p. 814-828, 2017.

CUARESMA, J. C.; DANYLO, O.; FRITZ, S.; MCCALLUM, I.; OBERSTEINER, M.; SEE, L.; WALSH, B. Economic development and forest cover: evidence from satellite data. **Scientific Reports**, Califórnia, v. 7, p. 40678, 2017.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 1-22, 2012.

FARIA, F. A. M. de; JARAMILLO, P. The future of power generation in Brazil: An analysis of alternatives to Amazonian hydropower development. **Energy for Sustainable Development**, v. 41, p. 24-35, 2017.

FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia**: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. Manaus: INPA, 2015a. v.1.

FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas na Amazônia**: impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras. Manaus: INPA, 2015b. v.2.

FENZL, N.; MENDES, R. L. R.; FERNANDES, L. L. **A sustentabilidade do sistema de abastecimento de água**: da captação ao consumo da água em Belém. Belém: NUMA/ITEC/UFPA, 153p, 2010.

HERNANDEZ, F. D. M. Hidrelétricas na Amazônia: renovabilidade e não renovabilidade da política energética. Se é desejável a renovabilidade das formas de conversão de energia, por que não é desejável renovar a política energética? **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi**. Ciências Humanas, Belém, v. 7, n. 3, p. 791-811.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. **IBGE Cidades**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/>. Acesso em: 15 de março de 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-IBGE. Sistema IBGE de Recuperação Automática-SIDRA. **Atividades desenvolvidas nas cidades**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2006/>. Acesso em: 10 de abril de 2019.

KUMAR, P.; DASGUPTA, R.; JOHNSON, B. A.; SARASWAT, C.; BASU, M.; KEFI, M.; MISHRA, B. K. Effect of land use changes on water quality in an ephemeral coastal plain: Khambhat City, Gujarat, India. **Water**, Basel, v. 11, n. 4, p. 724, 2019. DOI:10.3390/w11040724.

LE TOURNEAU, F. M. Is Brazil now in control of deforestation in the Amazon? **Cybergeography: European Journal of Geography**, 2016. <https://doi.org/10.4000/cybergeography.27484>.

LEES, A. C.; PERES, C. A.; FEARNSIDE, P. M.; SCHNEIDER, M.; ZUANON, J. A. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. **Biodiversity and Conservation**, Suíça, v. 25, n. 3, p. 451-466, 2016.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia Brasileira: redes convencionais e dados da Reanálise I do NCEP/NCAR, CRU e GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 22, 2018.

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 46, n. 2, p. 175-188, 2016.

MAIA, D.; FERNANDES, L. L.; TEIXEIRA, L. G. Diagnóstico do abastecimento e consumo de água segundo a percepção do usuário em duas áreas residenciais no estado

do Pará. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 4, n. 2, p. 105 – 115, 2016.

MARCAL, D.A; SILVA, C. E. Avaliação do impacto do efluente da estação de tratamento de esgoto ETE-Pirajá sobre o Rio Parnaíba, Teresina (PI). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, p. 761-772, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE-MMA. **Caderno da região hidrográfica amazônica**. Brasília DF: Secretaria de Recursos Hídricos, 2006. 124p.

NASCIMENTO, C. P.; SILVA, M.; FERREIRA, M. B. P. A pecuária como atividade primaz na Amazônia: uma discussão acerca dos seus aspectos ambientais, das populações humanas envolvidas e do papel das instituições na dinâmica desta atividade. **Revista de Estudos Sociais**, Cuiabá, n 33, v. 17, 2015.

NEPSTAD, D. C.; STICKLER, C. M.; SOARES FILHO, B.; MERRY, F. Interactions among Amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Sciences**, Londres, v. 363, n. 1498, p. 1737-1746, 2008.

PALHARES, J. C. P. Consumo de água na produção animal. **Comunicado Técnico EMBRAPA**, n. 102, p. 1-6, 2013.

PALHETA, J. M; SILVA, C. N.; OLIVEIRA NETO, A.; NASCIMENTO, F. R. Conflitos pelo uso do território na Amazônia mineral. **Mercator**, Fortaleza, v. 16, 2017. <https://doi.org/10.4215/rm2017.e16023>.

PEREIRA, B. D.; MENDES, C. M. Modernização da agricultura de Mato Grosso. **Revista de Estudos Sociais**, Cuiabá, n. 7, p. 61-76, 2002.

RECOMPENSA, J. L. C.; PEREIRA, B.D.; SCHEUER GRAFF, V. R.; GUIMARAES, R. Políticas públicas y Estado en Brasil: consecuencias económicas, sociales y ambientales en el desarrollo del município de Sorriso en Mato Grosso (Brasil). **Polis**, Santiago, v. 10, n. 30, p. 217-244, 2011.

ROZON, C.; LUCOTTE, M.; DAVIDSON, R.; PAQUET, S.; OESTREICHER, J. S.; MERTENS, F.; PASSOS, C. J. S.; ROMANA, C. Spatial and temporal evolution of family-farming land use in the Tapajós region of the Brazilian Amazon. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 45, n. 2, p. 203-214, 2015.

SANTARÉM. **Revisão do plano municipal de saneamento básico de Santarém - PA: 2020 - 2023**. Santarém: Prefeitura Municipal de Santarém, 2019. 138p.

SANTOS, C. A.; SERRÃO, E. A. O.; GONCALVES, L. J. M.; WANZELER, R. T. S.; LIMA, A. M. M. Zoneamento da distribuição da precipitação pluviométrica na bacia hidrográfica do rio tapajós. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 10, p. 3092-3106, 2014.

SANTOS, J. W. M. C. Aplicação do geoprocessamento na avaliação e espacialização das perdas físicas de água do sistema de abastecimento público de Rondonópolis-MT. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 19, n. 2, p. 51-67, 2007.

SANTOS, V. dos; LAURENT, F.; ABE, C.; MESSNER, F. Hydrologic response to land use change in a large basin in eastern Amazon. **Water**, Basel, v. 10, n. 4, p. 429, 2018.

SENNA, L. D.; MAIA, A. G.; MEDEIROS, J. D. F. The use of principal component analysis for the construction of the Water Poverty Index. **RBRH**, Porto Alegre, v. 24, 2019.

SILVA, A. S. da, M.; GHILARDI, H. T. Recursos hídricos, agropecuária e sustentabilidade: desafios para uma visão ecológica do planeta. **Revista Jurídica**, v. 2, n. 47, p. 78-98, 2017.

SILVA, D. M. A.; TERESA, F. B. Response of fish communities to intense drought in Brazilian savanna streams. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 12, n. 4, p. 618-628, 2017.

SILVA, M. N. A.; PESSOA, F. C. L.; SILVEIRA, R. N. P. O.; ROCHA, G. S.; MESQUITA, D. A. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 33, n. 4, p. 665-675, 2018.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO-SNIS. **Abastecimento de água municipal**. Disponível em: <http://app4.mdr.gov.br/serieHistorica/2019>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2020.

SONG, Xiao-Peng *et al.* Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. **Nature Sustainability**, v. 4, n. 9, p. 784-792, 2021.

TAHIRU, A. A.; DOKE, D. A.; BAATUWIE, B. N. Effect of land use and land cover changes on water quality in the Nawuni Catchment of the White Volta Basin, Northern Region, Ghana. **Applied Water Science**, v. 10, n. 8, p. 1-14. 2020.

TOLMASQUIM, M. T. Perspectivas e planejamento do setor energético no Brasil. **Estudos avançados**, São Paulo, v. 26, n. 74, p. 247-260, 2012.

VIEIRA, I. C. G.; SANTOS JUNIOR, R. A. O.; TOLEDO, P. M. D. Dinâmicas produtivas, transformações no uso da terra e sustentabilidade na Amazônia. *In*: SIFFERT FILHO, Nelson Fontes *et al.* **Um olhar territorial para o desenvolvimento**: Amazônia. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2014. p. [370]-395.

WALKER, R. T.; SIMMONS, C.; ARIMA, E.; GALVAN-MIYOSHI, Y.; ANTUNES, A.; WAYLEN, M.; IRIGARAY, M. Avoiding Amazonian catastrophes: prospects for conservation in the 21st Century. **One Earth**, v. 1, n. 2, p. 202-215, 2019.

WITTMANN, F.; JUNK, W. J. **The Amazon river basin**. The Wetland book II: Distribution, description and conser-vation. [S.l.:s.n], 2016. p. 1-16.

CAPÍTULO 3 DESMATAMENTO E CLIMA SAZONAL DA BACIA DO RIO TAPAJÓS, NA AMAZÔNIA BRASILEIRA²

RESUMO

O rio Tapajós é um dos mais importantes afluentes da margem direita do rio Amazonas, com relevante função ambiental, social e econômica. Esta pesquisa tem por objetivo analisar a relação entre o desmatamento e o clima das estações chuvosa e menos chuvosa da região da bacia do rio Tapajós. O método inicial avaliou as anomalias registradas nas estações chuvosas e menos chuvosa, de temperatura e precipitação em três anos sem ocorrência do fenômeno ENOS; as áreas com maior densidade de desmatamento utilizando a metodologia de Kernel; e correlacionou o desmatamento x precipitação e desmatamento x temperatura nas estações chuvosa e menos chuvosa, bem como foram analisadas as tendências das variáveis desmatamento, precipitação e temperatura a partir da técnica de Mann Kendall. Foram utilizados os dados do *Climatic Research Unit* (CRU), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC), Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite (PRODES), Agência Nacional de Águas (ANA) e *National Centers for Environmental Prediction/ National Oceanic and Atmospheric Administration* (NCEP/NOAA). Os resultados revelam anomalias significativas na temperatura e na precipitação. Na avaliação da densidade de desmatamento, notou-se que a maior contração se encontra ao longo das rodovias, com destaque para a densidade média nos dois últimos períodos estudados. Na correlação, os valores mais significativos ocorreram na relação entre desmatamento x temperatura (máxima e mínima) da estação menos chuvosa, nas sub-bacias do Médio e Baixo Tapajós, ou seja, em direção ao norte da bacia onde estão localizadas as Unidades de Conservação e Terras indígenas. Resultado análogo ao estudo da tendência para a bacia, pois mostrou tendência positiva de temperatura na estação menos chuvosa. Quanto a correlação entre desmatamento x precipitação os valores foram negativos, em sua maioria, corroborando o resultado da pesquisa sobre a tendência.

Palavras-chave: sazonalidade; precipitação; temperatura; desmatamento; bacia Tapajós.

² Artigo em processo de elaboração e tradução para ser submetido a periódico científico

ABSTRACT

The Tapajos River is one of the most important tributaries of the right bank of the Amazon River, with relevant environmental, social and economic functions. This research aims to analyze the relationship between deforestation and the climate in the rainy and off-rainy seasons of the Tapajos River basin region. The initial method evaluated the anomalies registered in the rainy and less rainy seasons, of temperature and precipitation in three years without occurrence of the ENSO phenomenon; the areas with greater density of deforestation using the Kernel methodology; and correlated deforestation x precipitation and deforestation x temperature in the rainy and less rainy seasons and; the trends of the variables deforestation, precipitation and temperature were analyzed from the Mann Kendall technique. We used data from the Climatic Research Unit (CRU), Center for Weather Forecasting and Climate Studies of the National Institute for Space Research (CPTEC), Program for Monitoring Deforestation of the Brazilian Amazon Forest by Satellite (PRODES), National Water Agency (ANA) and National Centers for Environmental Prediction/ National Oceanic and Atmospheric Administration (NCEP/NOAA). As a result, significant temperature and precipitation anomalies were observed. In the evaluation of the density of deforestation, it was noted that the greatest contraction is found along the highways, highlighting the average density in the last two periods studied. In the correlation, the most significant values occurred in the relationship between deforestation x temperature (maximum and minimum) in the least rainy season, in the sub-basins of the middle and lower Tapajos, that is, towards the north of the basin where the Conservation Units and Indigenous Lands are located. This result is analogous to the study of the tendency for the basin, as it showed a positive trend in temperature during the less rainy season. As for the correlation between deforestation x precipitation, the values were mostly negative, corroborating the results of the research on the trend.

Keywords: seasonality; rainfall; temperature; deforestation; Tapajos basin.

3.1 Introdução

O desmatamento de florestas no mundo gera grande preocupação entre pesquisadores e sociedade em geral por suas consequências negativas seja no meio ambiente, clima, saúde e outras (BENNETT, 2017; BOLOGNA; AQUINO, 2020). O empenho com estudos voltados para o clima em decorrência do desmatamento se deve aos constantes eventos extremos que o planeta vem sofrendo com enchentes, secas severas, ondas de calor e frio (WOLFF et al., 2018; FAZEL-RASTGAR, 2020).

Pesquisas realizadas concluíram que o aumento do calor extremo na América do Norte e na Europa está associado aos efeitos do desmatamento (STOY, 2018). Na América do Sul, em decorrência da degradação na Amazônia, estudos de simulação futura mostram um aumento na temperatura do ar, diminuição da precipitação na região e a redução considerável de áreas florestais (LEJEUNE, 2015; GOMES et al., 2019).

A Amazônia é conhecida mundialmente por suas florestas, grande disponibilidade de água doce e riquezas minerais. No entanto, nas últimas décadas, a região vem passando por grandes transformações que resultaram na degradação de grande parte da floresta (REIS, 2014; MATRICARDI et al., 2020).

O conjunto das atividades de uso da terra e diversidade das formas de alteração de sua cobertura (observadas na totalidade do território da bacia hidrográfica amazônica - 6.403.450,74 km², incluindo o Brasil e países andinos) tem gerado diversos questionamentos quanto aos seus reflexos no balanço hídrico regional, na sua interferência com os sistemas globais e na capacidade de resiliência dos ecossistemas, diante das mudanças (COE et al., 2017; FARINOSI et al., 2019; BAGHERI; CHAUDHARI; POKHREL, 2020).

Tais transformações tem gerado uma crescente preocupação com o meio ambiente, mais especificamente com a floresta amazônica, em função dos serviços ambientais oferecidos, da biodiversidade, ciclagem de água e armazenamento de carbono (BARRETO, 2020); auxiliando na manutenção do clima regional amazônico, bem como outras regiões do país, através do transporte atmosférico de umidade (FEARNSIDE, 2015; HOYOS et al., 2017; AGUDELO et al., 2019).

Um exemplo dessas transformações ocorre na bacia do rio Tapajós que, nas últimas décadas, vem sofrendo com degradações devido a uma grande pressão causada, principalmente, pelo aumento da economia do agronegócio, com o incremento das exportações de produtos

agrícolas e agroindustriais (ANDRADE, 2021), concomitante ao desmatamento para o agronegócio, existe a construção de rodovias para novas rotas do escoamento de grãos para o porto de Itatuba (THÉRY, 2019).

Exemplo disto, são as abordagens sobre as consequências da conversão maciça de floresta em pastagens com a diminuição da pluviosidade na Amazônia e nas regiões vizinhas (FEARNSIDE, 2003; SPRACKLEN; GARCIA-CARRERAS, 2015) e sul do continente (LE TOURNEAU, 2016); além do aumento na temperatura, as secas severas e enchentes (DE LOUREIRO et al., 2014). Outro exemplo é a imensa quantidade de partículas e gases emitidos pelas queimadas, que tem profundos efeitos nos climas regional e global (ARTAXO et al., 2006; SILVEIRA et al., 2020).

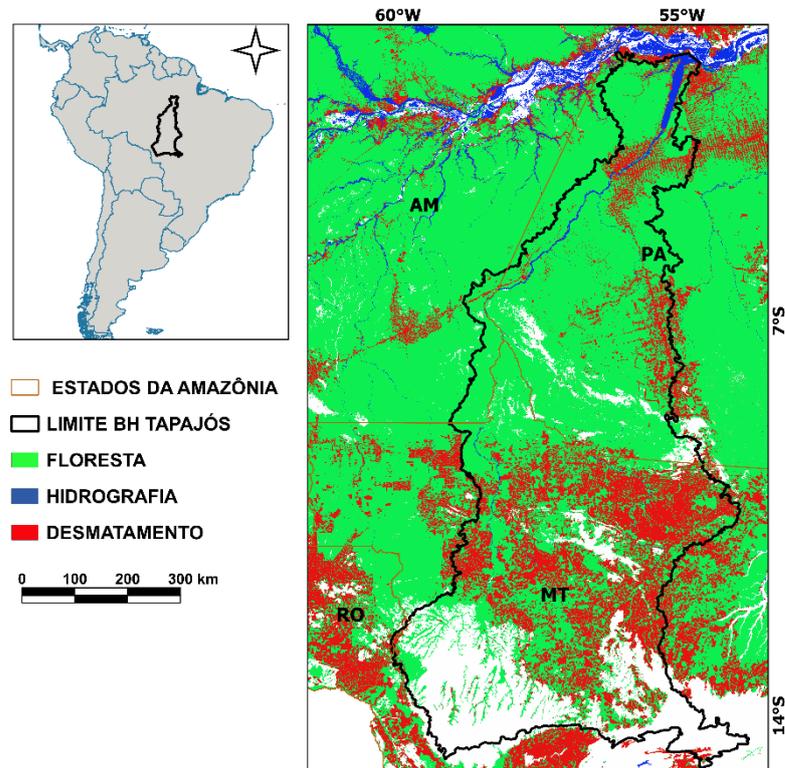
Em decorrência disso, este estudo visa analisar a relação entre o desmatamento e o clima das estações chuvosa e menos chuvosa da região da bacia do rio Tapajós, que representa 7,7% do território da bacia Amazônica, bem como avaliar os incrementos de desmatamento, sua relação com as estações chuvosa e menos chuvosa, e definir se existe um padrão estatístico de relação entre as áreas desmatadas com a temperatura e o quantitativo de chuvas na região.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Tapajós (Figura 3.1) possui área estimada em 492.115,88 km², está situada na Amazônia central brasileira, abrange os estados do Mato Grosso (58%), Pará (38%) e em menor proporção os estados do Amazonas (3%) e Rondônia (1%), conforme a Figura 3.2. Esta bacia possui relevância no contexto socioambiental da região, pois além do rio Tapajós ser o mais importante tributário da margem direita do rio Amazonas, configura-se em um espaço de disputa por território e recursos naturais, entre comunidades indígenas, agropecuaristas, extrativistas de madeira, posseiros, dentre outros (ABE et al., 2018). A porção norte da bacia é marcada pela presença de Áreas Protegidas: a Área de Proteção Ambiental (APA) do Tapajós localizada próximo ao município de Itaituba; e de Terras Indígenas. Estas ocupam quase 25% do território paraense (BIERI; PICANÇO, 2019), com um avanço intensificado das formas de uso da terra onde estão a Flona Tapajós e a Resex Tapajós Arapiuns.

Figura 3.1- Localização da bacia do rio Tapajós na Amazônia brasileira.

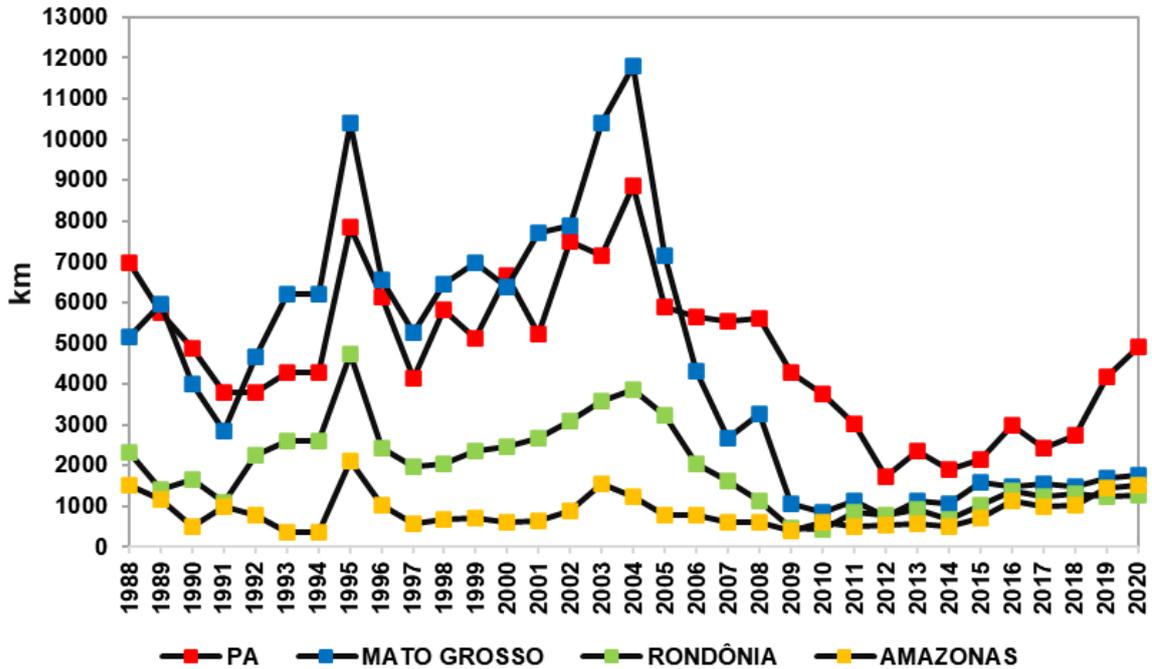


Fonte: Elaborado pela autora com dados do PRODES (2020).

O Estado do Pará lidera o desmatamento na Amazônia Legal desde o ano de 2006 (Figura 3.2). Entre 2009 e 2012 o desmatamento apresentou queda considerável, e instabilidade (aumentos e diminuição) até 2017, posteriormente, um aumento considerável a partir de 2018 quando saltou de quase 3.000 km² para um valor superior a 5.000 km² de área desmatada (PRODES, 2020).

O estado do Mato Grosso liderou o rank de desmatamento até 2005 com a maior área desmatada da floresta amazônica desde 1992. Neste estão localizadas as nascentes dos rios Juruena e Teles Pires formadores do rio Tapajós. Nas últimas décadas, no Mato Grosso, tem-se intensificado o agronegócio de tal forma que transformou o estado no maior produtor nacional commodities agrícolas, com destaque para as culturas de soja, milho, algodão e girassol, representando cerca de 60% da área plantada da região Centro-Oeste (VON DENTZ, 2019).

Figura 3.2 - Taxa de desmatamento dos Estados da Amazônia Legal de 1988 a 2020.



Fonte: Elaborado pelos autores com dados do PRODES (2020).

Em Rondônia o desmatamento é menor, quando comparado aos estados do Pará e Mato Grosso, porém mostra aumentos significativos desde 2009 quando apresentou a menor queda. Silveira et al. (2020) identificaram uma variação de 3,62% a e 2,6% da área do bioma Amazônico comprometidos com focos de calor vinculados à ocorrência de incêndios, com concentração em algumas regiões particulares, incluindo a porção central do estado de Roraima, sul do Amazonas, leste do Acre, porção mais setentrional de Rondônia, e o estado do Pará nas porções sudoeste ao longo da rodovia federal BR-163 (na bacia do Tapajós), entre unidades de conservação no sul, e nos assentamentos agrários próximo à rodovia Transamazônica (BR-230) no nordeste, concentrando cerca de um terço destas ocorrências no estado.

3.2.2 Dados utilizados

Existem duas estações bem definidas na bacia do rio Tapajós (SANTOS; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2019): a estação chuvosa (outubro a abril) e a estação menos chuvosa (maio a setembro). A partir dessa informação buscou-se junto a plataforma do *WorldClim* (banco de dados globais de tempo e clima) os dados meteorológicos do *Climatic Research Unit* (CRU), proveniente de estimativas de satélites e estações *in situ*, com resolução espacial de

aproximadamente 21 km. Utilizou-se dados acumulados de precipitação das estações chuvosa e menos chuvosa e para a temperatura do ar usou-se a média, dos anos de 2011-2012, 2014-2015 e 2016-2017. A escolha desses anos está vinculada a ausência da influência do fenômeno ENOS (El Niño Oscilação Sul - El Niño e La Niña) nos dados, segundo consta na plataforma do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE, 2021).

Além disso, utilizou-se dados de desmatamento do PRODES (Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite), disponível na plataforma Terra Brasilis (<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/>), desenvolvida pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para acesso e uso dos dados geográficos de monitoramento ambiental dos biomas brasileiros. Foram utilizados dados anuais (11 anos) do desmatamento para o período de 2008 a 2018 (PRODES/INPE, 2021).

3.2.3 Procedimentos metodológicos

Foram gerados mapas de precipitação das estações chuvosa e menos chuvosa considerando a forma acumulada (precipitação total de cada estação), e a temperatura do ar, calculou-se a média (máxima e mínima), dos períodos 2011-2012, 2014-2015 e 2016-2017; além disso, calculou-se a média das variáveis para 2000 a 2018 (19 anos). De posse dos dados observados e da média dos 19 anos calculou-se a anomalia ($X_i - \bar{X}$), sendo X_i o valor acumulado da estação e \bar{X} o valor médio (NERY et al., 2005).

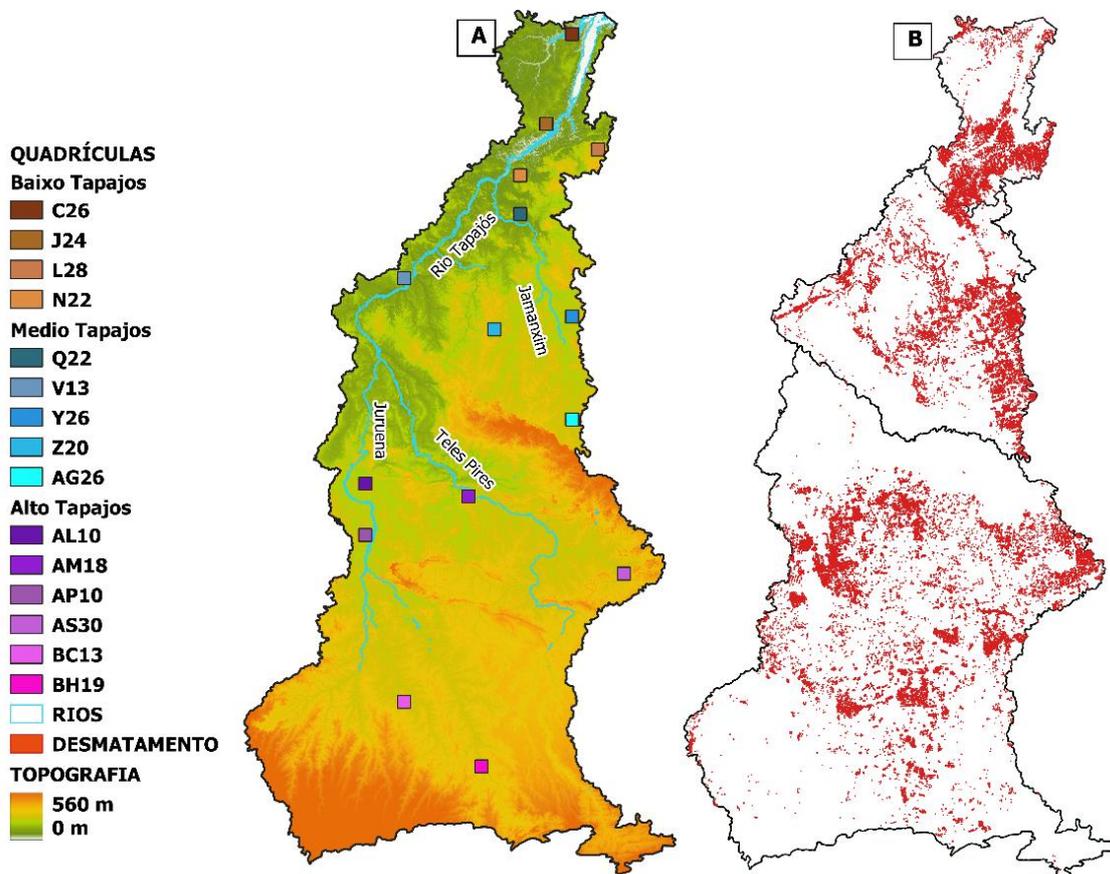
Com o objetivo de mostrar as áreas com maior densidade de desmatamento dos anos de 2010, 2013 e 2015 foram gerados três mapas de centroides (um para cada ano), em seguida, foi aplicado o estimador de densidade Kernel (YU; AI, 2014). A partir da concentração de desmatamento, os dados reclassificados definiram três gradações de densidade: baixa (verde), média (amarelo) alta (vermelho).

Na quantificação do grau de associação/dependência entre o desmatamento e a precipitação, foram: (1) selecionadas quadrículas medindo 21 km² (Figura 3.3), este valor tem como base a resolução espacial da precipitação e temperatura utilizadas. A seleção das quadrículas se deu buscando as regiões com maior quantidade de áreas desmatadas; e (2) a partir da seleção, calculou-se o valor total de desmatamento e a média da precipitação e

temperatura máxima e mínima das estações chuvosa e menos chuvosa, em cada quadrícula, para o período de 2008 a 2018 (11 anos).

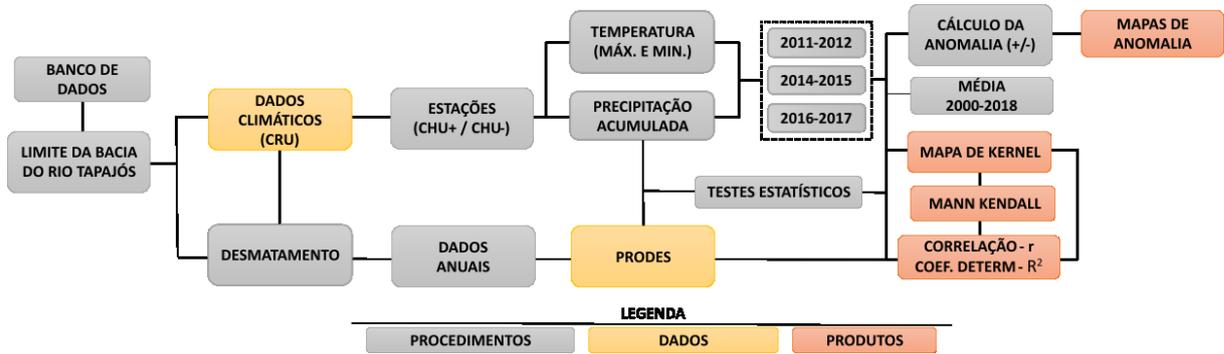
Aplicou-se os testes de correlação de Pearson (r) e o Coeficiente de Determinação (R^2) aos valores encontrados das variáveis, no qual citam-se os trabalhos de Debortoli et al. (2017) e Leite Filho, Pontes e Costa (2019), como referências para o teste de correlação entre a precipitação e desmatamento, na região do sul da Amazônia.

Figura 3.3 - Localização das quadrículas selecionadas para a quantificação da relação entre desmatamento e precipitação e temperatura máxima e mínima: A) Posição das quadrículas nas regiões do Baixo, Médio e Alto Tapajós e, B) Área desmatada nas três sub-bacias.



Outro teste aplicado, foi o não paramétrico de Mann Kendall (CABRAL JÚNIOR; LUCENA, 2020) para análise de tendência das estações chuvosa e menos chuvosa das variáveis precipitação e temperatura (2000 a 2018) e desmatamento (2008 a 2020) na bacia. A Figura 3.4 apresenta o resumo da metodologia utilizada neste estudo.

Figura 3.4- Fluxograma do resumo da metodologia utilizada para fazer a relação entre o desmatamento e o clima da bacia do Tapajós.



Para efeito de discussão, analisou-se a atuação dos principais fenômenos precipitantes e presentes na estação chuvosa da bacia: a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). As informações sobre as atuações foram adquiridas nos Boletins Técnicos do CPTEC/INPE (2021).

Como no geral, a ZCIT está associada ao gradiente inter-hemisférico (Dipolo do Atlântico), responsável pela modulação (norte-sul) desse fenômeno sobre o Oceano Atlântico, analisou-se a atuação do dipolo baseada no índice do MMA (Módulo Meridional do Atlântico) o qual demonstra as fases positiva (desfavorável à precipitação) e negativa (favorável à precipitação), do dipolo do Atlântico (CAVALCANTI, 2016). Os dados do índice foram adquiridos no site do NCEP/NOAA (*National Centers for Environmental Prediction/ National Oceanic and Atmospheric Administration*).

A anomalia da vazão da estação chuvosa de 2014-15, de duas estações fluviométricas localizadas na bacia, uma situada no rio Tapajós (estação Buburé) e a outra localizada próxima a confluência entre os rios Juruena e Teles Pires (estação Fontanilhas) foi considerada para diagnose do efeito sobre a recarga dos sistemas hídricos superficiais. Os dados foram obtidos a partir do Sistema Hidro (<http://www.snirh.gov.br/hidrotelemetria>), da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

3.3 Resultados

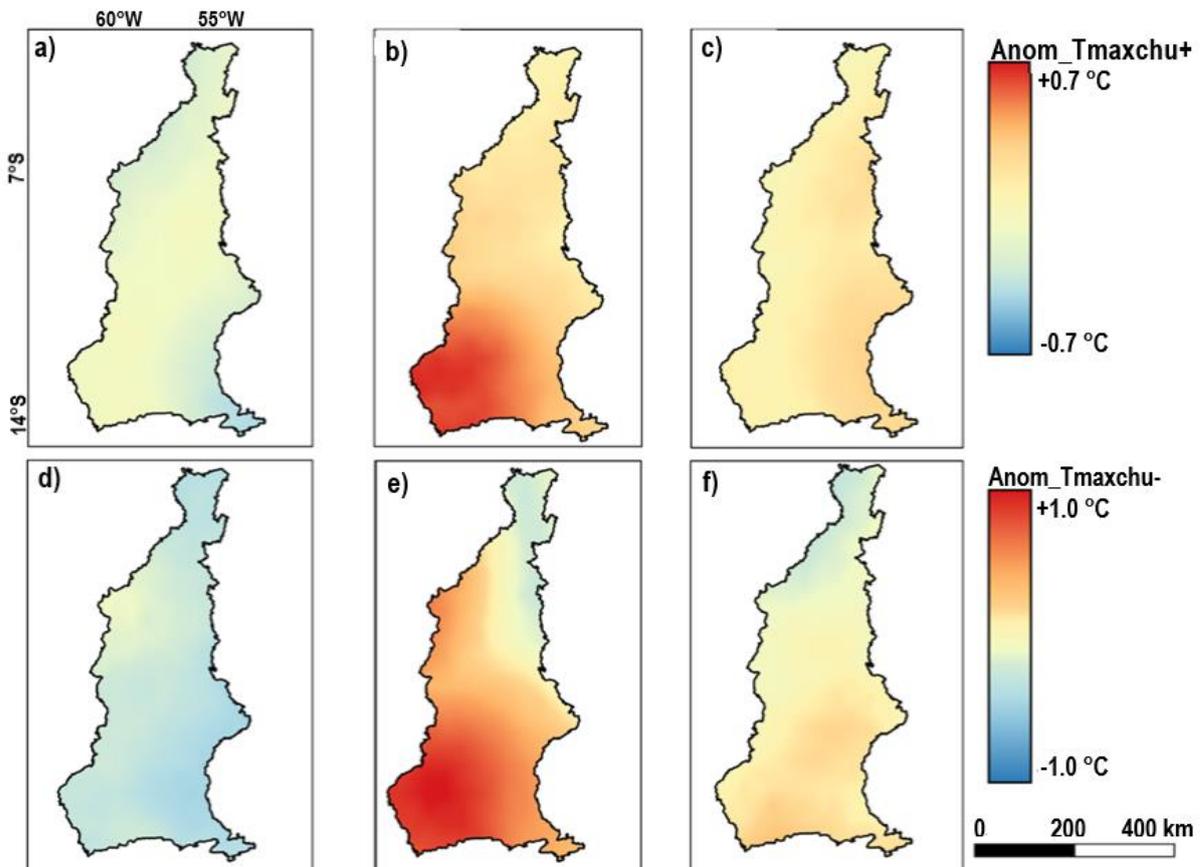
3.3.1 Anomalia da precipitação e temperatura do ar nas estações chuvosa e menos chuvosa da bacia do rio Tapajós

Os maiores valores de anomalias positivas da estação chuvosa da temperatura máxima (Figuras 3.5a, 3.4b e 3.5c) estão em 2014-15 (Figura 3.5b) e 2016-2017 (Figura 3.5c), com

valores de até $0,7^{\circ}\text{C}$ (região sudoeste, Figura 3.5b). O valor máximo da anomalia positiva de 2016-17 (Figura 3.5c) foi de $0,3^{\circ}\text{C}$, na região leste da bacia. Por outro lado, em 2011-12 (Figura 3.5a) ocorreu anomalia negativa de até $0,3^{\circ}\text{C}$ na região sudeste.

Na estação menos chuvosa, os valores positivos de anomalia chegam a $1,0^{\circ}\text{C}$ e negativos a $0,5^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.5d). Em 2014-15 (Figura 3.5e), notam-se valores positivos de anomalia em praticamente toda a bacia, atingindo a $1,0^{\circ}\text{C}$ na região sudoeste, exceto no extremo norte, em que se observam valores negativos de $0,2^{\circ}\text{C}$. Esse mesmo valor de anomalia é observado na região norte da estação menos chuvosa de 2016-17 (Figura 3.5f), nas demais regiões ocorreram valores positivos de até $0,2^{\circ}\text{C}$.

Figura 3.5 - Anomalia da temperatura máxima (Anom_Tmax) das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017).



A Tabela 3.1 apresenta a estatística descritiva (média e desvio padrão) da precipitação e da temperatura do ar das estações chuvosa e menos chuvosa.

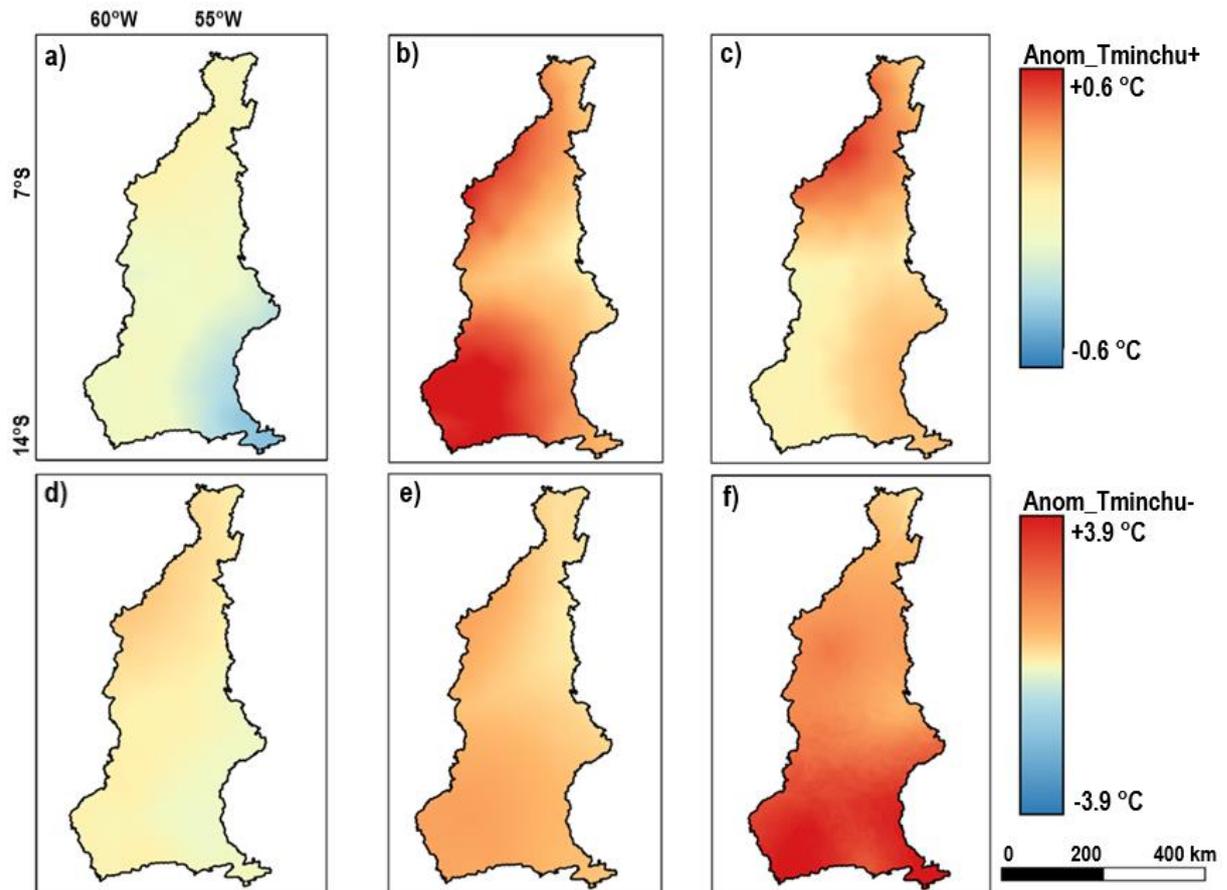
Tabela 3.1 - Análise estatística descritiva do clima sazonal das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-) da bacia do rio Tapajós para os períodos de 2011-12, 2014-15 e 2016-17.

Média	PRP		Tmax		Tmin	
	Chu+	Chu-	Chu+	Chu-	Chu+	Chu-
Desvio Padrão						
2011/12						
Média	1835,6	242,9	30,8	33,2	20,9	19,0
Desvio Padrão	131,3	111,7	0,4	1,0	1,4	2,4
2014/15						
Média	1816,8	237,8	31,3	33,9	21,3	19,7
Desvio Padrão	206,7	116,8	0,4	0,9	1,3	2,0
2016/17						
Média	1897,6	246,2	31,1	33,5	21,2	21,2
Desvio Padrão	126,2	111,3	0,4	1,0	1,4	1,4

Nota-se, que o maior valor da média da temperatura máxima nas duas estações ocorreu em 2014-15 e o menor em 2011-12. A maior variação da temperatura máxima foi entre os períodos da estação menos chuvosa, chegando a $0,7^{\circ}\text{C}$ quando se compara a média da estação menos chuvosa de 2012 e a de 2015. Na estação chuvosa, esse aumento foi de $0,5^{\circ}\text{C}$. Quanto ao desvio padrão da temperatura máxima, ficou em 0,4 nos três períodos da estação chuvosa e na estação menos chuvosa foi em média 1,0.

Assim como na temperatura máxima (Figura 3.5) a temperatura mínima também mostra a predominância de valores de anomalias positivas (Figura 3.6). Na temperatura mínima das duas estações só são observados valores negativos de anomalia em 2011-12 (Figuras 3.6a e 3.6d), chegando a $0,3^{\circ}\text{C}$ na estação chuvosa da região sudeste (Figura 3.6a), porém na estação menos chuvosa (Figura 3.6d) esse valor diminui para $0,1^{\circ}\text{C}$ na mesma área. Nas demais áreas predominam anomalias positivas, principalmente na região noroeste (Figuras 3.6a e 3.6d).

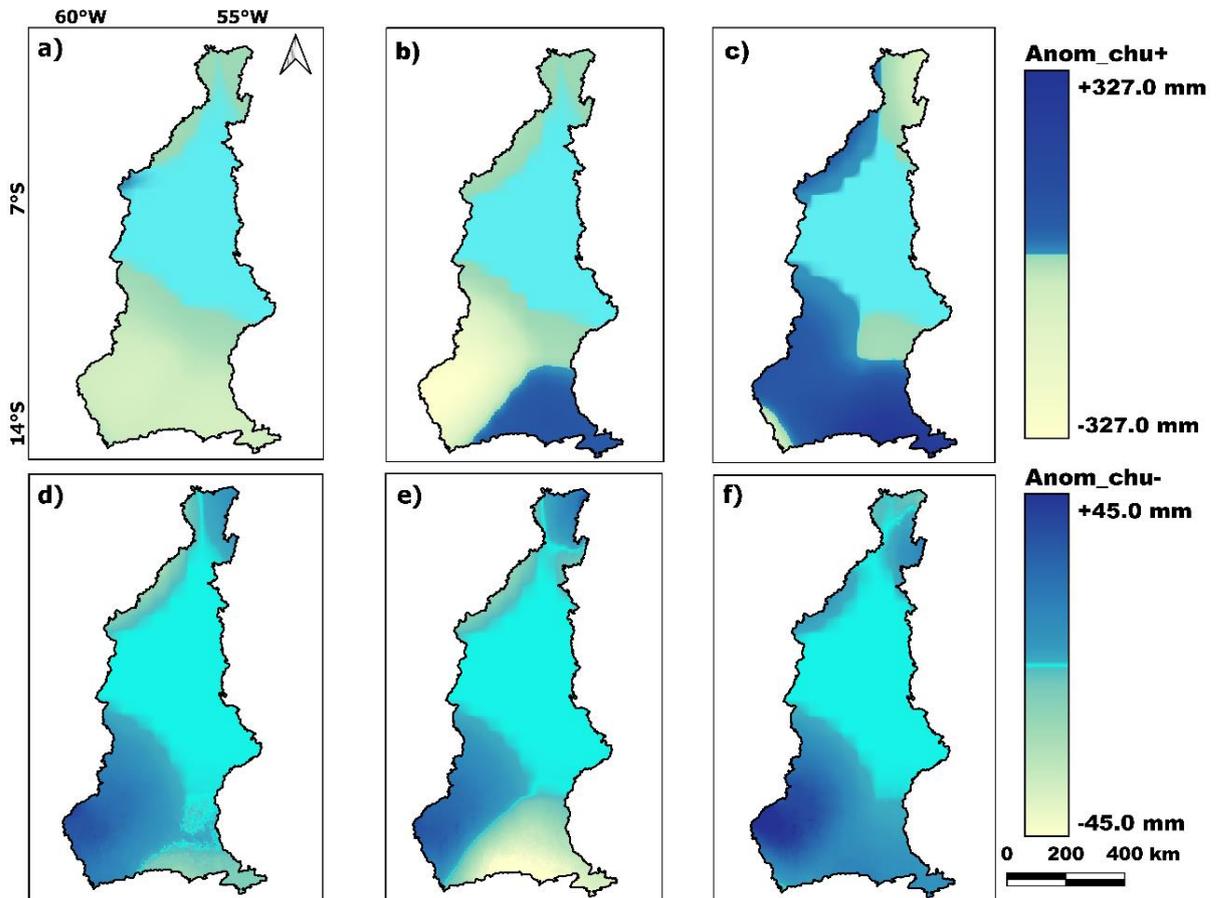
Figura 3.6 - Anomalia da temperatura mínima (Anom_Tmin) das estações chuvosa (chu+) e menos chuvosa (chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017).



Nos demais períodos (Figuras 3.6b, 3.6c, 3.6e e 3.6f) os valores de anomalia são apenas positivos chegando a 0,6°C na estação chuvosa e a 3,9°C na estação menos chuvosa. Os maiores valores de anomalia positiva (0,6°C) ocorrem ao sul e noroeste da bacia. Valor parecido, com anomalia positiva (0,5°C), é observado na porção noroeste (Figura 3.6c). Quanto aos valores da estação menos chuvosa (Figuras 3.6e e 3.6f), estes são menores no ano de 2015 (Figura 3.6e), mas em um patamar alto, em torno de 1,5°C, ao sul e oeste. Os maiores valores ocorreram em 2017 (Figura 3.6f) quando a anomalia se aproxima dos 4,0°C ao sul da bacia, e nas demais áreas o menor registro aproxima-se de 1,0°C. A temperatura média mínima tem uma variação maior na estação menos chuvosa, bem como os valores do desvio padrão (Tabela 1). Os menores valores das médias ocorreram em 2011-12 nas duas estações e os maiores valores ocorreram em 2014-15 (estação chuvosa, 21,3°C) e 21,2°C (estação menos chuvosa de 2017).

No que tange ao volume de chuva, a bacia apresenta anomalia negativa de precipitação (Figura 3.7), em sua maior parte, nos períodos estudados na estação chuvosa (Figuras 3.7a, 3.7b e 3.7c).

Figura 3.7 - Anomalia da precipitação das estações chuvosa (Anom_chu+) e menos chuvosa (Anom_chu-). a) estação chuvosa (2011-12); b) estação chuvosa (2014-15); c) estação chuvosa (2016-17); d) estação menos chuvosa (2012); e) estação menos chuvosa (2015); e f) estação menos chuvosa (2017).



Na estação chuvosa de 2011-12 (Figura 3.7a) observa-se somente a anomalia negativa, sendo maior na região sul e noroeste, com valores próximos a 90 mm. No período seguinte (Figura 3.5b), apesar da região sudeste apresentar anomalia positiva (próximo a 70 mm) na região sudoeste, os valores da anomalia negativa chegam a 327 mm e valores também elevados de anomalia negativa nas demais regiões. Em 2016-17 (Figura 3.7c), nota-se anomalia positiva em uma área maior sobre a bacia, com valores de até 160 mm nas regiões sul e noroeste, porém nas demais áreas apresenta anomalia negativa, com maior valor ao norte da bacia.

Quanto a anomalia na estação menos chuvosa (Figuras 3.7d, 3.7e e 3.7f) ocorre o inverso, a bacia apresenta na maior parte de sua região uma anomalia positiva, com maiores valores no Sudoeste atingindo 45 mm (Figuras 3.7d, 3.7e e 3.7f), sendo o menor valor registrado para o norte, nos três períodos analisados. A maior anomalia negativa ocorreu na região sudeste (Figura 3.7e) e região noroeste (Figuras 3.7d e 3.7e). A região em azul claro, correspondem as áreas em que não houve anomalia.

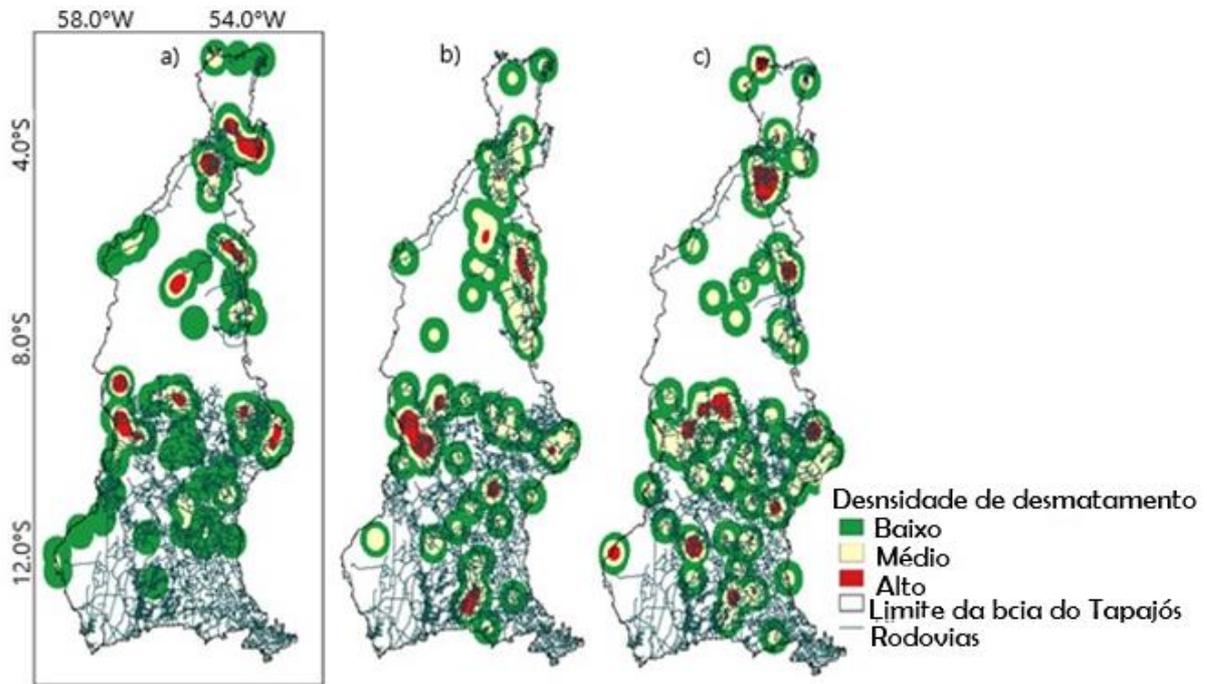
As menores médias ocorreram no período 2014-15 nas duas estações e onde, também, se observam os maiores desvios padrão (Tabela 3.1). Além disso, os maiores valores de média e menores desvios padrão aconteceram em 2016-17.

3.3.2 Análise integrada entre o desmatamento e a precipitação

A variabilidade dos dados de desmatamento, agrupados segundo a densidade de Kernel, ao longo das rodovias (Figura 3.8) indica que a maior concentração está na parte central e nordeste da bacia nos três anos, com algumas áreas de alta densidade na porção norte.

Em 2010, as densidades de desmatamento, mais frequentes, foram as baixas e altas (Figura 3.8a), em que, as altas densidades ocorreram principalmente na parte central e nordeste da bacia, quanto aos de média densidade, ocorreram em menor proporção. Em 2013 e 2015 (Figuras 3.8b e 3.8c) observam-se que os desmatamentos de média densidade aumentaram especialmente nas porções nordeste e extremo norte da bacia nesses anos e, percebe-se ainda, um aumento na densidade de desmatamento, já que em 2010, nesta região, o desmatamento era, em sua maioria de baixa densidade. De forma geral, predomina o desmatamento das cabeceiras da bacia, concentrando-se do médio curso (porção central) para o alto curso, comprometendo as áreas de maior anomalia no período seco (Figura 3.7).

Figura 3.8 - Densidade de desmatamento na bacia do rio Tapajós para os anos de 2010, 2013 e 2015.



O resultado da correlação (r) e do coeficiente de determinação (R^2) entre a precipitação (Chu) e o desmatamento, e entre temperatura (Tmax) e desmatamento das quadrículas selecionadas nas regiões do Baixo, Médio e Alto Tapajós é apresentado na Tabela 3.2.

Os valores mais expressivos de correlação estão no Médio-Baixo Tapajós nas correlações entre desmatamento x temperaturas (máxima e mínima), em que algumas quadrículas apresentaram valores de até 0,75 de correlação. Na correlação entre desmatamento x precipitação os valores foram menos significativos. No Alto Tapajós os resultados foram mais significativos na correlação entre o desmatamento x temperaturas (máxima e mínima) e sugere pouca correlação entre o desmatamento x precipitação nessa região. A amostragem realizada buscou a maior uniformidade da paisagem interna de cada quadrícula, de forma que a relação pudesse ter uma correspondência mais direta com a forma de cobertura da terra dominante (área desmatada). A resposta mais eficiente foi direcionada com a temperatura e mais discreta com a precipitação pluviométrica em decorrência da variabilidade espacial e das características fisiográficas diferenciadas da bacia, entre as regiões Médio-Alto e Médio-Baixo.

Tabela 3.2- Resultados da correlação (r) e do coeficiente de determinação (R^2) entre o desmatamento x temperatura máxima (Tmax), desmatamento x temperatura mínima (Tmin) e desmatamento x precipitação, para as estações chuvosa (Chu+) e menos chuvosa (Chu-), calculados nas quadrículas selecionadas das sub-bacias do rio Tapajós para o período de 2008 a 2018.

Correlação entre desmatamento x precipitação e desmatamento x temperatura													
Sub-bacias	Quadrículas	Tmaxchu+		Tmaxchu-		Tminchu+		Tminchu-		Chu+		Chu-	
		r	R ²	r	R ²	r	R ²						
Baixo	C26	0,37	0,14	0,10	0,01	0,03	0,00	-0,21	0,04	0,13	0,02	0,39	0,15
	J24	-0,30	0,09	-0,28	0,08	-0,58	0,34	-0,51	0,26	0,34	0,11	-0,02	0,00
	L28	-0,34	0,11	-0,66	0,43	-0,43	0,19	-0,70	0,49	0,19	0,04	-0,22	0,05
	N22	-0,28	0,08	0,11	0,01	-0,04	0,00	0,37	0,14	-0,19	0,03	0,41	0,17
Médio	Q22	-0,14	0,02	0,19	0,03	-0,08	0,01	0,10	0,01	-0,60	0,37	0,43	0,19
	V13	0,28	0,08	0,75	0,56	0,40	0,16	0,47	0,22	-0,19	0,04	-0,17	0,03
	Z20	0,44	0,20	0,05	0,00	0,44	0,19	0,18	0,03	-0,10	0,01	0,00	0,00
	Y26	-0,62	0,39	-0,63	0,40	-0,63	0,40	-0,61	0,37	0,00	0,00	-0,32	0,10
	AG26	-0,45	0,20	-0,14	0,02	-0,45	0,20	-0,14	0,02	-0,01	0,00	-0,24	0,06
Alto	AL10	-0,01	0,00	-0,20	0,04	-0,01	0,00	-0,2	0,04	-0,03	0,00	-0,11	0,01
	AM18	0,16	0,03	0,25	0,06	0,16	0,02	0,25	0,06	-0,19	0,04	-0,16	0,03
	AP10	-0,49	0,24	-0,24	0,06	-0,48	0,23	-0,24	0,06	0,08	0,01	0,01	0,00
	AS30	-0,43	0,19	-0,06	0,00	-0,43	0,19	-0,06	0,00	0,12	0,02	0,18	0,03
	BH19	0,12	0,02	0,56	0,31	0,12	0,02	0,56	0,31	-0,16	0,02	0,08	0,01

Os resultados do teste de Mann Kendall (Tabela 3.2) mostram valores estatísticos significativos. Observa-se que na estação menos chuvosa o valor do S é negativo e o p -valor abaixo de 0,05 o que significa uma tendência negativa de precipitação. Na estação chuvosa observa-se que o valor do S é positivo demonstrando tendência positiva de precipitação.

A temperatura mostra tendência positiva, com exceção da temperatura máxima da estação menos chuvosa (Tmax-chu-), as demais apresentam o valor de p -valor significativo (abaixo de 0,05), sendo destaque a Tmin-chu- com o valor do Tau de 0,44. Em relação ao desmatamento não houve resultado significativo de tendência, o que pode ter ocorrido em função do período utilizado.

Tabela 3.3- Resultados do teste de Mann-Kendall para as estações chuvosa e menos chuvosa da precipitação e temperatura das estações chuvosa e menos chuvosa e o desmatamento na bacia. Onde: Chu+ (chuvosa), Chu- (menos chuvosa), Tmax-chu+ (Temperatura máxima da estação chuvosa), Tmax-chu- (Temperatura máxima da estação menos chuvosa), Tmin-chu+ (Temperatura mínima da estação chuvosa) e Tmin-chu- (Temperatura mínima da estação menos chuvosa).

Mann Kendall Test					
Variáveis	Statistic S	Var (S)	Tau	p-value	Alpha
Chu+	4320	2896013	0,099	0,01115	0,05
Chu-	-4670	2925206	-0,106	0,00634	0,05
Deforestation	2600	268666	0,333	0,1272	0,05
Tmax-chu+	4597	1639297	0,167	0,0003	0,05
Tmax- chu-	2615	2590038	0,072	0,1043	0,05
Tmin-chu+	8049	2706214	0,211	0,0000	0,05
Tmin- chu-	17580	2797603	0,441	0,0000	0,05

3.4 Discussão

A bacia do rio Tapajós tem um importante papel como contribuinte da bacia hidrográfica do rio Amazonas, pois contribui com uma vazão média de 13.500 m³/s, o que coloca o rio Tapajós na lista dos 20 rios de maior vazão no mundo (LATRUBESSE, 2015). Este contexto, concorre com a tendência instalada nas últimas décadas, marcada pela economia voltada ao agronegócio (FEARNSIDE, 2007; OLIVEIRA NETO; NOGUEIRA 2016; OLIVEIRA NETO, 2019), associada ao transporte de grãos da região central do país, que segue pela BR-163 até o porto de Santarém-PA (COELHO et al., 2021).

Esta bacia tem diversas especificidades, a saber: ambientais e de solo, complexa topografia e uma vegetação formada por dois biomas: o amazônico que compõe as regiões do Estado do Pará até o norte do Mato Grosso, e o cerrado, localizado na parte sul da bacia (DEBORTOLI et al., 2017). Esta paisagem é associada a valores médios de precipitação (acumulado anual) elevados (superiores a 1470 mm, podendo alcançar valores próximos de 2500 mm), com distribuição crescente das cabeceiras em direção a foz, caracterizando duas estações, uma menos chuvosa, de maio a setembro, e outra chuvosa de outubro a abril, com

maio e outubro caracterizados como períodos de transição (SANTOS et al., 2015; SANTOS et al.; 2019).

O clima sazonal da bacia apresenta anormalidades de temperatura e precipitação, tendo sido identificada anomalia positiva elevada de temperatura mínima (valor próximo a 4,0°C) na região sul da bacia durante a estação menos chuvosa de 2017.

Apesar do estudo ocorrer em anos em que não houve a atuação do fenômeno ENOS, a exceção da estação menos chuvosa do ano de 2015, ainda tiveram os dois primeiros meses do início do fenômeno El Niño (agosto e setembro), pois o CPTEC/INPE (2021) considera no cálculo o mês de agosto de um ano a julho do ano seguinte. Cunha et al. (2019) consideraram o El Niño de 2015-16 como o terceiro mais intenso da era moderna. Levando em consideração que a Amazônia foi impactada por uma menos chuvosa de grande proporção pelo fenômeno, pode-se inferir a provável influência sobre os resultados encontrados na temperatura mínima da estação menos chuvosa de 2017.

Além da influência dos fenômenos naturais (El Niño, por exemplo), destaca-se a participação do antropismo na região (NOBRE et al., 1991; WERTH; AVISSAR, 2002; VOLDOIRE; ROYER, 2004; SAMPAIO et al., 2007; GLOOR et al., 2015; BAKER; SPRACKLEN, 2019; CUNHA et al., 2019). Estes autores registram vários elementos que avaliam as alterações de uso e cobertura da terra na região, destacando um aumento na temperatura do ar na Amazônia, chegando até 3,0 °C em decorrência do desmatamento na região. Eles argumentam ainda que o aumento da temperatura, poderá reduzir a evapotranspiração e aumentar o fluxo de calor latente, por exemplo.

Uma das regiões que tiveram um valor considerável de anomalia positiva na temperatura do ar foi a região noroeste da bacia. Nesta, ocorre uma atividade minerária de destaque no estado do Pará, envolvendo os municípios de Itaituba, Jacareacanga, Novo Progresso e Trairão (BIERI; PIKANÇO, 2019; SOUZA-FILHO et al., 2021), com grande concentração de extração de ouro. O desmatamento ocasionado pela extração mineral gera maior exposição do solo, contribuindo para o aumento do fluxo de calor sensível da região, alterando o equilíbrio de energia na superfície (SILVÉRIO et al., 2015; MACDOUGALL; BELTRAMIO, 2017).

Em relação aos resultados encontrados na precipitação, pode-se mencionar a anomalia negativa observada em várias regiões da bacia, especialmente o expressivo valor de aproximadamente 330 mm observada na estação chuvosa de 2014-15. A precipitação da bacia do Tapajós, no Médio Baixo, está diretamente associada as bandas de nebulosidade da ZCIT

(março a maio), e o Médio Alto Tapajós está associada à ZCAS nos meses de outubro a fevereiro (SANTOS et al., 2015).

A partir das análises das atuações (episódios) de tais fenômenos, constatou-se que o deslocamento da ZCIT até a região norte da bacia ocorreu de forma discreta quando se comparou a quantidade de episódio em que o fenômeno se deslocou ao hemisfério sul (na maioria dos episódios atingiu 1°S) aos episódios em que ele atingiu 3° S (região extremo norte da bacia), o que foi justificada pela atuação do dipolo positivo (resultado encontrado utilizando o MMA) nos três períodos chuvosos estudados, contribuindo para uma condição não favorável à descida da ZCIT sobre a Amazônia e Nordeste brasileiro (SILVA; SANTOS, F. ; SANTOS, J., 2020).

Quanto a atuação da ZCAS observou-se nos boletins técnicos do CPTEC/INPE (2021) que houveram meses em que o fenômeno não teve nenhum episódio (por exemplo novembro de 2011, outubro e dezembro de 2014, outubro, novembro e dezembro de 2016) e em alguns episódios os volumes pluviométricos podem ter sido maiores nas regiões costeira e oceânica (localizadas no sudeste brasileiro e oceano Atlântico Sul, respectivamente) da ZCAS, uma vez que o fenômeno é mais atuante em anos que o ENOS ocorre em sua fase fria (CARVALHO et al., 2004). Tais fatores podem ter influenciado na anomalia negativa (327 mm) de precipitação da região sudoeste da bacia em 2014-15 (região que compõe a ZCAS amazônica). Complementando a análise, verificou-se a anomalia da vazão no mesmo período (2014-15) em duas estações fluviométricas da bacia. Os valores obtidos indicaram uma anomalia negativa da vazão na estação chuvosa, tanto na cabeceira quanto na foz o que corrobora o resultado da precipitação.

A anomalia positiva de precipitação na estação chuvosa de 2014-15, na região sudeste, e 2016-17 na região sul da bacia, podem ter sido influenciadas pela atuação de outros fenômenos que influenciam no período chuvoso, tais como: o Vórtice Ciclone de Altos Níveis (VCAN), a Alta da Bolívia (AB), a Zona de Convergência de Umidade - ZCOU e os Complexo Convectivos de Mesoescala (CCM) (CAVALCANTI, 2016).

A ação antrópica pode ter sua parcela de contribuição nos resultados negativos encontrados, pois o desmatamento tem uma relação direta com o aumento da temperatura e diminuição de precipitação, em consequência da diminuição da evapotranspiração (SPERA et al., 2016). Bathiany et al. (2010) comprovaram em seus estudos que a deflorestação nos trópicos diminui a precipitação na Amazônia e aumenta a temperatura. Rizzo et al. (2020) concluíram

que a precipitação da bacia do rio Xingu diminuiu 245 mm nos últimos 40 anos, havendo ainda uma redução dos dias com chuva estando associado as elevadas taxas de deflorestação em todo o sudeste da Amazônia.

Os resultados de anomalia negativa de precipitação, no noroeste da bacia, coincidem com a região onde estão localizadas unidades de conservação (Parque Nacional da Amazônia, Florestas Nacionais Itaituba I e II, a Floresta Nacional de Crepuri e a Proteção Ambiental Área de Tapajós) que tem sofrido diminuição em seus limites em decorrência da degradação pela mineração e construção de hidrelétricas na região da bacia do Tapajós (VERDUM et al, 2019; BIERI; PICANÇO, 2019).

Quanto a densidade do desmatamento na região da bacia para os anos de 2010, 2013 e 2015, observou-se que em 2010 os valores são baixos, sofrendo um incremento nos últimos dois anos; concentrando-se principalmente ao longo das rodovias.

Na região da bacia do Tapajós está a BR-163, que foi implantada com o intuito de estabelecer acesso ao interior da Amazônia, possibilitando o fluxo de pessoas e de cargas e que hoje sua importância está no escoamento da produção de soja do centro-norte do Mato Grosso ao porto de Santarém-PA, passando por áreas de preservação e indígenas causando sérios problemas ambientais (NETO; NOGUEIRA, 2016; NETO, 2019). Além disso, a bacia sofre com outros os problemas como a construção de hidrelétricas, garimpos, atividades madeireiras, pecuária extensiva de corte entre outros.

Sem asfalto a rodovia já causou grandes prejuízos ao meio ambiente e com a pavimentação aumenta grandemente o impacto sobre o desmatamento na área circunvizinha, acelerando a destruição da floresta não somente nas proximidades à rodovia, mas nas áreas sob sua influência (FEARNSIDE, 2007). O discurso do Estado de trazer desenvolvimento e sustentabilidade a partir da construção da rodovia em questão, é abordado no estudo de Brito e Castro (2018) para os municípios de Santarém, Itaituba, Novo Progresso (Estados do Pará) e Sinop (Mato Grosso), no qual os autores mostram as mazelas conquistadas com essa construção.

Os resultados da correlação mostraram valores mais expressivos no Baixo e Médio Tapajós, especialmente entre o desmatamento x temperatura que têm relação direta. Vale ressaltar que a expansão geográfica da fronteira do agronegócio está voltada para o Norte do Mato Grosso, sendo uma opção válida para o escoamento dos grãos, os portos como os de Itacoatiara (AM), Santarém (PA), Vila do Conde-PA (SOUZA et al., 2020).

Na avaliação comparativa entre Alto, Médio e Baixo Tapajós, houve mais valores de correlação negativa que positiva na correlação entre o desmatamento x precipitação. Na região da Amazônia, alguns estudos também obtiveram esse resultado, como foi o caso de Bonini et al. (2014) que encontraram correlação negativa entre o desmatamento e precipitação do município de Colíder, no Estado do Mato Grosso (Sul da Amazônia - município localiza-se dentro da bacia do Tapajós) evidenciando que quanto maior for a área desmatada, menor será a taxa pluviométrica observada. Spracklen e Garcia-Carreras (2015) concluíram que há uma relação linear negativa entre a precipitação e a extensão do desmatamento na Amazônia. Debortoli et al. (2017) e Leite Filho, Pontes e Costa, (2019) correlacionaram as variáveis precipitação e desmatamento na região do sul da Amazônia e encontraram resultados significativos.

No resultado da correlação do desmatamento com a precipitação observa-se que houve resultados mais expressivos no período menos chuvoso. Neste período não há atuação de fenômenos meteorológicos, diferente do período do chuvoso em que os fenômenos podem interferir nas relações entre as variáveis. Logo, a preservação da floresta amazônica, assim como todas as florestas, é de suma importância para um adequado e equilibrado funcionamento dos ecossistemas e manutenção da diversidade biológica. Além disso, a floresta exerce funções significativas como o controle da erosão, da desertificação, da qualidade da água e do sequestro do carbono atmosférico.

3.5 Conclusões

Os resultados deste estudo apresentam a relação entre o desmatamento e o clima sazonal na bacia do rio Tapajós. O desmatamento ocorre principalmente ao longo das rodovias construídas na região, cujo aumento da densidade média do desmatamento pode tornar o clima mais vulnerável, dada a importância da floresta para uma boa regulação do ciclo hidrológico e do meio ambiente.

Na pesquisa sobre a anomalia de precipitação e temperatura, os resultados demonstraram anomalia negativa na precipitação, sendo mais significativa na estação chuvosa, e o oposto na estação menos chuvosa com valores mais discretos. Para a temperatura, a anomalia positiva apresenta valores mais significativos principalmente nas regiões sul, sudoeste e noroeste da bacia.

Os resultados da correlação entre desmatamento x precipitação e desmatamento x temperatura, apresentaram valores mais significativos em direção ao norte da bacia, corroborando com a preocupação histórica, ou seja, o acelerado desmatamento no Alto Tapajós vem mudando nas últimas décadas para as outras sub-bacias, especialmente para aquelas regiões com áreas de preservação ambiental. A bacia apresentou tendência negativa de precipitação na estação menos chuvosa e tendência positiva nas temperaturas máximas e mínimas.

Recomenda-se uma verificação mais pontual na região, pois a bacia tem suas particularidades, tais como, área de drenagem superior a 490 mil km², variação topográfica, diversidade de comportamento de variáveis climáticas que acompanham o eixo norte-sul da bacia, fragmentação ambiental (com várias áreas alteradas alternando com a cobertura florestal), além da densa rede hidrográfica que recobre a região. Sugerem-se, portanto, estudos específicos, uma vez que o desmatamento pode afetar negativamente o clima local, assim como as áreas que são alimentadas pelo bombeamento atmosférico realizado pela floresta.

REFERÊNCIAS

- ABE, C. A.; LOBO, F. D. L.; DIBIKE, Y. B.; COSTA, M. P. D. F.; SANTOS, V. dos, NOVO, E. M. L. Modelling the effects of historical and future land cover changes on the hydrology of an Amazonian Basin. **Water**, v. 10, n. 7, p. 932, 2018.
- ANDRADE, R. One river and 40+ Dams: the China factor in the Amazonian Tapajós Waterway. *In*: HABICH-SOBIEGALLA, Sabrina; PLÜMMER, F. **The political economy of hydropower in Southwest China and Beyond**. Cham: Palgrave Macmillan, 2021. p. 275-293.
- ARTAXO, P.; OLIVEIRA, P. H.; LARA, L. L.; PAULIQUEVIS, T. M.; RIZZO, L. V.; PIRES JUNIOR, C.; PAIXÃO, M. A.; LONGO, K. M.; FREITAS, S.; CORREIA, A. L. Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 3, p. 1-22, 2006.
- BAGHERI, O.; CHAUDHARI, S. N.; POKHREL, Y. Hydrological Thresholds for sustainable land use and land cover change in Amazon river basin. *In*: AGU Fall. **Meeting Abstracts**. 2020. p. H030-0019.
- BAKER, J.; SPRACKLEN, D. Climate benefits of intact Amazon forests and the biophysical consequences of disturbance. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, n. 47, p. 1-13, 2019. doi.org/10.3389/ffgc.2019.00047
- BARRETO, J. B. *et al.* Pagamentos por Serviços Ambientais (PSA): um estudo acerca da legislação brasileira e da estruturação de acordos. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e38791211306-e38791211306, 2020.

- BATHIANY, S.; CLAUSSEN, M.; BROVKIN, V.; RADDATZ, T.; GAYLER, V. Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale forest cover changes in the MPI Earth system model. **Biogeosciences**, v. 7, n. 5, p. 1383-1399, 2010.
- BENNETT, L. Deforestation and climate change. **Climate Institute**, v. 1400, 2017.
- BIERI, M. L.; PICANÇO, V. M. P. A. Considerations of mining in Tapajos basin and impacts on Munduruku land. **International Journal of Development Research**. v. 9, p. 28622-28631, 2019.
- BOLOGNA, M.; AQUINO, G. Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-9, 2020.
- BONINI, I.; RODRIGUES, C.; DALLACORT, R.; MARIMON JUNIOR, B. H.; CARVALHO, M. A. C. Rainfall and deforestation in the municipality of Colíder, southern Amazon. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 483-493, 2014.
- BRITO, R.; CASTRO, E. Desenvolvimento e conflitos na Amazônia: um olhar sobre a colonialidade dos processos em curso na BR- 163. **Revista Nera**, n. 42, p. 51-73, 2018.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análises das precipitações pelos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. **Mercator**, v. 19, e19001, [1–14], 2020.
- CABRAL JÚNIOR, J. B.; LUCENA, R. L. Análisis de las precipitaciones por las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y Kruskal-Wallis. **Mercator**, v. 19, 2020. doi.org/10.4215/rm2020.e19001.
- CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004.
- CAVALCANTI, I. F. A. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 464p.
- COE, M. T.; BRANDO, P. M.; DEEGAN, L. A.; MACEDO, M. N.; NEILL, C.; SILVÉRIO, D. V. The Forests of the Amazon and Cerrado Moderate Regional Climate and Are the Key to the Future. **Tropical Conservation Science**, v. 10, p. 1-6, 2017. doi:10.1177/1940082917720671.
- COELHO, A.; AGUIAR, A.; TOLEDO, P. et al. Rural landscapes and agrarian spaces under soybean expansion dynamics: a case study of the Santarém region, Brazilian Amazonia. **Reg Environ Change** 21, 100 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01821-y>
- CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Boletins Técnicos**. 2021. Disponível em www.cptec.inpe.br.
- CUNHA, A. P.; MARENGO J. A.; ALVALA R. C.; DEUSDARA-LEAL K. R.; CUARTAS, L. A; SELUCHI, M.; ZERI, M.; RIBEIRO-NETO, G.; BRODEL, E.; CUNNINGHAM, C.; COSTA, L.; MORAES, O. L. L. **Secas e seus impactos no Brasil 2018**. São José dos Campos: CEMADEN, n. 1, 2019. 19p. <http://www2.cemaden.gov.br/secas-e-seus-impactos-no-brasil-em-2018>.

- DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística sem matemática para psicologia: usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed. 2006.
- DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; HIROTA, M.; RODRIGUES FILHO, S.; LINDOSO, D. P.; NABUCET, J. Detecting deforestation impacts in Southern Amazonia rainfall using rain gauges. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 6, p. 2889-2900, 2017.
- FARINOSI, F. *et al.* Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, v. 7, n. 8, p. 993-1017, 2019.
- FEARNSIDE, P. M. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: The environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon. **Environmental Management**, v. 39, n. 5, p. 601, 2007. doi:10.1029/2001JD000717. 2002.
- FEARNSIDE, P. M. **A floresta amazônica nas mudanças globais**. Manaus: INPA, 2003, 134 p.
- FEARNSIDE, P. M. A seca e o desmatamento. **Ciência Hoje**, v. 54, n. 322, p. 52. 2015.
- GLOOR, M.; BARICHIVICH, J.; ZIV, G.; BRIENEN, R.; SCHÖNGART, J.; PEYLIN, P.; BARCANTE LADVOCAT CINTRA, B.; FELDPAUSCH, T.; PHILLIPS, O.; BAKER, J. Recent Amazon climate as background for possible ongoing and future changes of Amazon humid forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 29, n. 9, p. 1384-1399, 2015.
- GOMES, V. H. F. *et al.* Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. **Nature Climate Change**, v. 9, n. 7, p. 547-553, 2019.
- LATRUBESSE, E. M. Quaternary megafans, large rivers and other avulsive fluvial systems: a potential "who is who" in the geological record. **Earth Science Reviews**, v. 146, p. 1-30, 2015.
- LE TOURNEAU, F-M. Is Brazil now in control of deforestation in the Amazon? **European Journal of Geography**, n. 769, 2016. doi.org/10.4000/cybergeo.27484.
- LEITE FILHO, A. T.; PONTES, V. Y.de S; COSTA, M. H. Effects of deforestation on the onset of the rainy season and the duration of dry spells in southern Amazonia. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 10, p. 5268-5281, 2019.
- LEJEUNE, Q. *et al.* Influence of Amazonian deforestation on the future evolution of regional surface fluxes, circulation, surface temperature and precipitation. **Climate Dynamics**, v. 44, n. 9, p. 2769-2786, 2015.
- LOUREIRO, R. S.de; SARAIVA, J. M.; SARAIVA, I.; SENNA, R. C.; FREDÓ, A. S. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 83-94, 2014.
- MACDOUGALL, A. H.; BELTRAMI, H. Impact of deforestation on subsurface temperature profiles: implications for the borehole paleoclimate record. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 7, p. 074014, 2017.
- MATRICARDI, E. A. T. *et al.* Long-term forest degradation surpasses deforestation in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 369, n. 6509, p. 1378-1382, 2020.

NOBRE, C.A.; SELLERS, P. J.; SHUKL, A. J. Amazonian deforestation and regional climate change. **J. Clim.**, v. 4, p. 957-988, 1991.

NERY, J. T. *et al.* Estudo da precipitação do estado do Paraná e sua associação à temperatura da superfície do Oceano Pacífico. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 161-171, 2005.

OLIVEIRA NETO, T. As rodovias na Amazônia: uma discussão geopolítica. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 501, 2019. doi.org/10.4000/confins.21176.

OLIVEIRA NETO, T.; NOGUEIRA, R. J. B. A geopolítica rodoviária na Amazônia: BR-163/Santarém-Cuiabá. **Revista de Geopolítica**, v. 6, n. 2, p. 1-21, 2016.

PRODES (INPE / MCTIC). **Incremento no desmatamento da Amazônia Legal a partir de 2008**. Divisão de Processamento de Imagens - DPI / OBT / INPE. Disponível em <http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/geonetwork/srv/api/records/a5220c18-f7fa-4e3e-b39b-feeb3ccc4830>. Acesso em out. 2020.

PRODES/INPE. **Monitoramento do desmatamento da floresta Amazônica brasileira por satélite**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2021. Disponível em www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes

REIS, C. T. M. dos.; RIBEIRO, O.S. Amazônia: responsabilidade sobre o mundo. **Revista Eletrônica Mutações**, v. 5, n. 9, p. 045-061, 2014.

RIZZO, R.; GARCIA, A. S.; VILELA, V. M. D. F.; BALLESTER, M. V. R.; NEILL, C.; VICTORIA, D. C.; COE, M. T. Land use changes in Southeastern Amazon and trends in rainfall and water yield of the Xingu River during 1976–2015. **Climatic Change**, v. 162, p. 1419-1436, 2020.

SAMPAIO, G.; NOBRE, C.; COSTA, M. H.; SATYAMURTY, P.; SILVEIRA SOARES-FILHO; CARDOSO, M. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Submitted in Geophys. Res. Lett.**, v. 34, L17709, 2007. doi.org/10.1029/2007GL030612

SANTOS, C.; ARAÚJO, I. B.; WANZELER, R. T. S.; SERRÃO, E. A. O.; FARIAS, M. H. C. S.; LIMA, A. M. M. Regionalização hidroclimatológica da bacia hidrográfica do Rio Tapajós. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 1, p. 32-51, 2015.

SANTOS, V. C.; BLANCO, C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Distribution of rainfall probability in the Tapajos River Basin, Amazonia, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, 2019.

SILVA, F. F.; SANTOS, F. A.dos; SANTOS, J. M. dos. Índice de anomalia de chuva (IAC) aplicado ao estudo das precipitações no município de caridade, Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 426-442, 2020. doi.org/10.5380/abclima.v27i0.74274

SILVEIRA, M. V. F.; PETRI, C. A.; BROGGIO, I. S.; CHAGAS, G. O.; MACUL, M. S.; LEITE, C. C. S.; S.; FERRARI, E. M. M.; AMIM, C. G. V.; FREITAS, A. L. R.; MOTTA, A. Z. V.; CARVALHO, L. M. E.; SILVA JUNIOR, C. H. L.; ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. E. O. C. Drivers of fire anomalies in the Brazilian Amazon: Lessons Learned from the 2019 Fire Crisis. **Land**, v. 9, n. 516, p. 1-24, 2020. doi:10.3390/land9120516.

- SILVÉRIO, D. V.; BRANDO, P. M.; MACEDO, M. N.; BECK, P. S.; BUSTAMANTE, M.; COE, M. T. Agricultural expansion dominates climate changes in southeastern Amazonia: the overlooked non-GHG forcing. **Environmental Research Letters**, v. 10, n. 10, p. 104015, 2015.
- SOUSA, A. C.; CANDIDO, L. A.; ANDREOLI, R. V. Variabilidade interanual da precipitação e fluxo de umidade sobre a Amazônia usando o QTCM. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 41-56, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331015>
- SOUZA, M. M. *et al.* Optimization of soybean outflow routes from Mato Grosso, Brazil. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 8, n. 08, p. 2, 2020.
- SOUZA FILHO, P. W. M. *et al.* Land-use intensity of official mineral extraction in the Amazon region: Linking economic and spatial data. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 4, p. 1706-1717, 2021.
- SPERA, S. A. *et al.* Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global Change Biology**, v. 22, n. 10, p. 3405-3413, 2016.
- SPRACKLEN, D. V.; GARCIA-CARRERAS, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 21, p. 9546-9552, 2015.
- THÉRY, H. A. expansão da produção de grãos e a infraestrutura de circulação no Brasil. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 2019, n. 3, p. 284-305, 2019.
- VERDUM, R.; GAMBOA, C.; BEBBINGTON, A. J. **Assessment and scoping of extractive industries and infrastructure in relation to deforestation: Amazonia**. Peru: Institute for the Sciences of Nature, Territory and Renewable Energies of the Pontifical Catholic University of Peru (INTE-PUCP), 2019, 81p.
- VOLDOIRE, A.; ROYER, E. J. F. Tropical deforestation and climate variability. **Climate Dynamics**, v. 22, p. 857-874, 2004.
- VON DENTZ, E. Produção agrícola no estado do Mato Grosso e a relação entre o agronegócio e as cidades: o caso de Lucas do Rio Verde e Sorriso. **Ateliê Geográfico**, v. 13, n. 2, p. 165-186, 2019.
- WERTH, D. E.; AVISSAR, R. The local and global effects of Amazon deforestation. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, 2002. doi.org/10.1029/2001JD000717
- WOLFF, N. H. *et al.* Impacts of tropical deforestation on local temperature and human well-being perceptions. **Global Environmental Change**, v. 52, p. 181-189, 2018.
- YU, W.; AI, T. The visualization and analysis of urban facility pois using network kernel density estimation constrained by multi-factors. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 4, p. 902-926. 2014. doi.org/10.1590/S1982-21702014000400050

CAPÍTULO 4 IMPACTOS FUTUROS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS NO REGIME CHUVOSO E NAS CHEIAS SAZONAIS DA BACIA DO TAPAJÓS, NA AMAZÔNIA CENTRAL³

RESUMO

Estudos sobre impactos ocasionados pela hidrometeorologia é de suma importância para prevenir e mitigar os riscos ao meio ambiente e a sociedade, no presente e futuro. O objetivo dessa pesquisa foi avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso (precipitação) e das cheias sazonais (cota fluviométrica) sobre a bacia do rio Tapajós. Foi apresentada uma nova definição de regime chuvoso para a região da bacia e buscou-se bases de dados em ponto de grade compatíveis com os dados das estações convencionais, a fim de utilizá-las para o cálculo do viés para a correção dos modelos do CMIP6 a serem usados na simulação do clima futuro (2021-2050/2051-2080). No estudo do clima futuro, não foi utilizado somente um único resultado do ensemble dos modelos globais, mas sim os melhores modelos com indicativo de aumento e os modelos com indicativo de diminuição de precipitação para a região. Avaliou-se a frequência de extremos máximos e mínimos da precipitação e cota de cheia para cinco estações localizadas na bacia. Os resultados mostraram que o regime chuvoso da bacia para o período de 1991 a 2020 é de novembro a abril, e que o CHIRPS é a base de dados com melhor semelhança com os dados de estações. Os dados fluviométricos têm sazonalidade do regime hidrológico bem pronunciado de cheia e vazante com atraso em relação a precipitação. Nos resultados sobre o clima futuro, foi concluído que a bacia estará passiva de alternâncias de aumento/diminuição da frequência de extremos máximos/mínimos na precipitação e da cota de cheia tanto para o futuro mais próximo quanto no final do século. E as estações fluviométricas mais propícias às essas mudanças são que se encontram no Médio Baixo Tapajós, especialmente a estação de Itaituba.

Palavras-chave: regime chuvoso; precipitação; cota; clima futuro

³ Artigo em processo de confecção e tradução para ser submetido a periódico científico

ABSTRACT

Studies on impacts caused by hydrometeorology are of paramount importance to prevent and mitigate risks to the environment and society, in the present and future. The objective of this research was to evaluate the future impacts of global climate change on rainfall (precipitation) and seasonal floods (fluviometric quota) in the Tapajos River basin. A new definition of rainfall regime for the basin region was presented and grid-point databases compatible with conventional station data were sought in order to use them to calculate the bias for the correction of CMIP6 models to be used in the future climate simulation (2021-2050/2051-2080). In the study of future climate, not only one result of the ensemble of global models was used, but the best models indicating an increase and the models indicating a decrease in precipitation for the region. The frequency of maximum and minimum extremes of precipitation and flood elevation for five stations located in the basin was evaluated. The results showed that the rainfall regime of the basin for the period from 1991 to 2020 is from November to April, and that CHIRPS is the database with the best similarity with station data. The fluviometric data has a very pronounced seasonality of the hydrological regime of flood and ebb with delay in relation to precipitation. In the results on future climate, it was concluded that the basin will be subject to alternations of increase/decrease in the frequency of extremes of maximum/minimum precipitation and flood elevation both in the near future and at the end of the century. And the fluviometric stations most prone to these changes are those in the Middle Lower Tapajos, especially the Itaituba station.

Keywords: rainfall regime; precipitation; quota; future climate

4.1 Introdução

A bacia amazônica tem extrema importância por ser responsável pelo equilíbrio ambiental e climático mundial, pela quantidade de água doce que comporta (FOLEY et al., 2002), pelos serviços ambientais prestados (FEARNSIDE, 2008) e por ter a maior planície fluvial do Brasil.

A maior parte dos rios na Amazônia são navegáveis pela população como meio de locomoção, por subsistência (pesca), é utilizado para energia elétrica e para o transporte de mercadorias. Nesse contexto, os rios da região são imprescindíveis para a economia local e para o país no transporte de grãos (soja e milho), como por exemplo, o transporte do porto de Itaituba à Santarém, no Pará para exportação (ROCHA et al., 2020).

Mudanças na hidrologia podem ter impactos substanciais locais e globalmente (JIMENEZ et al., 2019). Nas últimas décadas a região amazônica enfrenta extremos de secas e cheias acarretando grandes prejuízos para comunidade e para a economia brasileira.

Os regimes de cheias e secas dos rios da Amazônia estão diretamente ligados ao regime da precipitação. Esta variável meteorológica é crucial para o ciclo hidrológico, portanto, mudanças na sua distribuição espacial e temporal tendem às mudanças no nível dos rios.

Na hidrologia, a alteração devido às mudanças climáticas tem impactos como a diminuição da descarga, fluxos extremos, escassez de água, perigo de enchentes (SCHEWE et al., 2014; ASADIEH; KRAKAUER, 2017; BRÊDA et al., 2020), bem como de secas, por isso, cada vez mais, surgem estudos utilizando o método de elasticidade que mostra tendências na hidrologia para o futuro (BRÊDA et al., 2020; DEUSDARÁ-LEAL et al., 2022).

Modelos climáticos globais simulam o clima presente e reproduzem a variabilidade espacial e temporal da precipitação demonstrando que os estudos de clima futuro merecem confiabilidade (OLIVEIRA et al., 2023). Tais modelos demonstram que haverá mudanças na variabilidade climática (OLIVEIRA et al., 2023; ANJOS et al., 2021; SILVEIRA et al., 2013) e com isso, aumento na frequência e intensidade de extremos de calor, ondas de calor marinhas, precipitação intensa ou diminuição, secas agrícola e ecológica em algumas regiões (IPCC, 2021).

Os resultados referentes aos estudos de mudanças do clima futuro são cada vez mais de Modelos Climáticos Globais (GCMs) (PARSONS, 2020; LUCAS, 2022; LLOPART et al., 2014), em função da melhoria na resolução espacial desses modelos através de métodos de correção por Downscaling e correção de viés. Os modelos do CMIP6 têm se destacado nas análises das mudanças futuras do clima no mundo (COOK et al., 2020), América do Sul (OLIVEIRA et al., 2023), Brasil (ANJOS et al., 2021) e na Amazônia (LI et al., 2021; SILVEIRA et al., 2013).

As pesquisas na Amazônia ainda são poucas desenvolvidas, mas vem aumentando em decorrência de sua importância na regulação do clima de grande parte do Brasil e por sua importância para o mundo, porém pesquisas de forma mais pontuais nas sub-bacias ainda são escassos. Os trabalhos realizados na região atualmente confirmam que, assim como a temperatura (consenso de aumento entre os modelos), a precipitação terá mudanças (LI et al., 2021; SILVEIRA et al., 2013) e um fator de impacto será a hidrologia devido a proporcionalidade com a precipitação.

Apesar de ainda não se ter um consenso para o estudo futuro da precipitação, a maioria dos modelos demonstram resultados de diminuição na maior parte do globo (IPCC,2021; COOK et al., 2020), não sendo diferente para a Amazônia (PARSONS, 2020; LUCAS, 2022; CHEN et al., 2014) por outro lado, modelos também mostram aumento na chuva (LI et al., 2021).

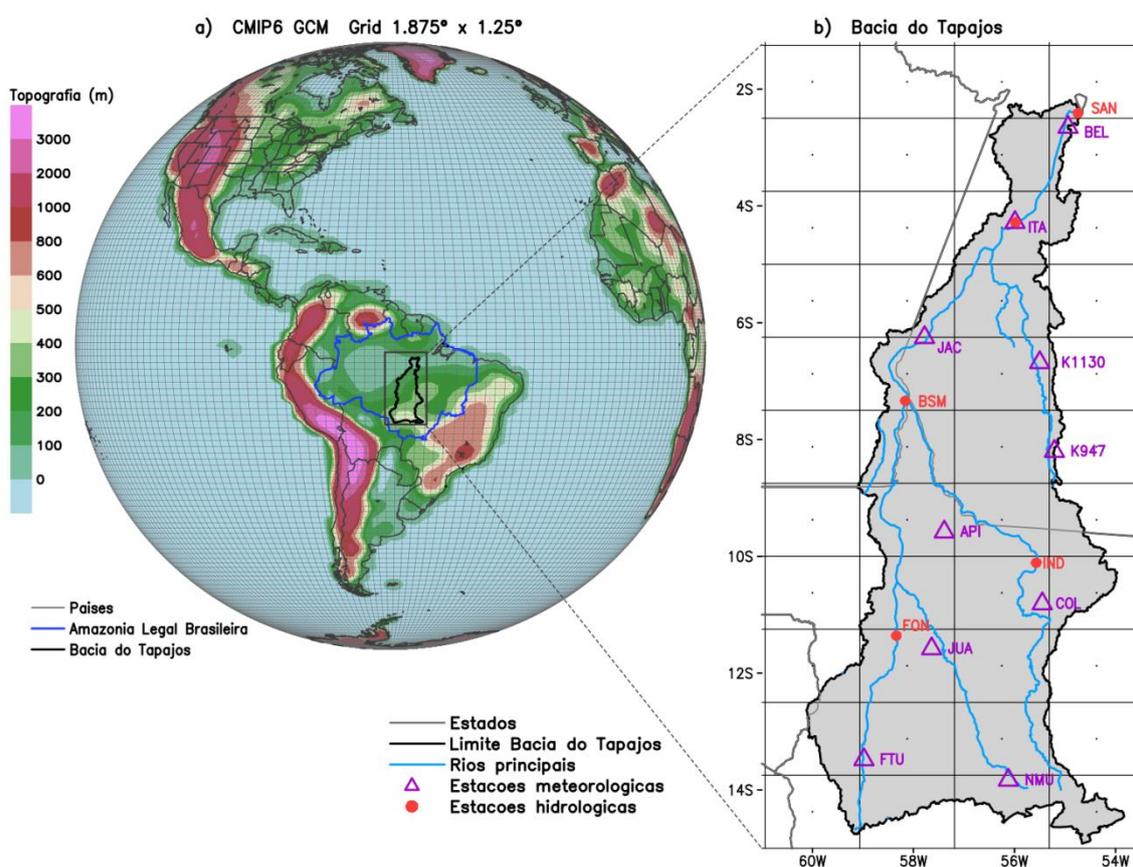
O entendimento das mudanças na precipitação é importante para compreender como o regime hidrológico pode mudar frente às mudanças climáticas e assim haver um planejamento e mitigação de possíveis impactos (YUAN; WOOD; MA, 2015; BRÊDA et al., 2020). Aqui buscou-se avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso (precipitação) e de cheias sazonais (cota fluviométrica) da bacia do Tapajós na Amazônia central.

4.2 Material e Métodos

A área de estudo é a bacia do rio Tapajós, localizada na região central da bacia amazônica (Figura 4.1b), que inclui áreas dentro dos Estados do Pará, Amazonas, Mato Grosso e Rondônia, com extensão acima 490 mil km². É o quinto maior afluente do Amazonas, drenando 476.674 km². Seus principais rios são: Tapajós (extensão > 1.800 km), Juruena

(aproximadamente 1000 km) e Teles Pires (~1600 km) sua confluência é com rio Amazonas, fluindo assim para norte da bacia. Quanto a precipitação, possui uma clara variabilidade sazonal com um total de precipitação no período chuvoso de 400 mm/mês nas regiões tropicais (PEREIRA et al., 2017). Na caracterização das paisagens da bacia, possui altos relevos no cerrado mato-grossense e terras de várzea na região de Santarém, demonstrando um elevado desnível altimétrico com terrenos bastantes acidentados na porção sul da bacia e uma planície aluvial na parte norte (ALARCON; MILLIKAN; TORRES, 2016).

Figura 4.1- Localização das estações meteorológicas convencionais (INMET e ANA) e hidrológicas (ANA) sobre a bacia do rio Tapajós.



4.2.1 Dados

Foram utilizados dados mensais de precipitação (PREC) e de cotas fluviométricas (CFLUV), para o período de 1991 a 2020 (30 anos), das estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e VLF Serviços LTDA (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Estações convencionais de precipitação (PREC, INMET e ANA) e cotas fluviométricas (CFLUV, ANA).

ESTAÇÕES	FONTE/ OPERADORA	LATITUDE	LONGITUDE	DADOS	PERÍODO DISPONÍVEL
ITA	INMET	-4.27	-55.99	PREC	1985 a 2021
BEL	INMET	-2.64	-54.94	PREC	1985 a 2020
K1130	ANA/VFL	-6.67	-55.50	PREC	1987 a 2021
JAC	ANA/VFL	-6.24	-57.78	PREC	1982 a 2021
K497	ANA/VFL	-8.19	-55.12	PREC	1977 a 2021
API	ANA/CPRM	-9,57	-57,39	PREC	1982 a 2021
COL	ANA/CPRM	-10.80	-55.45	PREC	1982 a 2021
JUA	ANA/CPRM	-11.57	-57.64	PREC	1984 a 2020
FTU	ANA/CPRM	-13.82	-58.98	PREC	1983 a 2021
NMU	ANA/CPRM	-13.82	-56.12	PREC	1985 a 2020
SAN	ANA/CPRM	-2,41	-54,74	CFLUV	1930 a 2021
ITA	ANA/VLF	-4,28	-55,98	CFLUV	1968 a 2021
BSM	ANA/VLF	-7,34	-58,16	CFLUV	1975 a 2022
IND	ANA/CPRM	-10,11	-55,57	CFLUV	1975 a 2021
FON	ANA/CPRM	-11,36	-58,34	CFLUV	1977 a 2021

Além dos dados de estações convencionais *in-situ*, utilizou-se dados observacionais de precipitação em pontos de grade com altas resoluções horizontais, do grupo *Clima Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS)* que utiliza estimativas de satélites mesclados com dados de estações e resolução 5.5 km, descrito por Funk et al., 2015, e do *Climatic Research Unit (CRU) version 4 (HARRIS et al., 2020)* com resolução espacial de 4.4 km.

Os dados de clima futuro (2021-2050/2051-2080) foram utilizados do CMIP6, encontrados em <https://climexp.knmi.nl/start.cgi> e detalhado em Eyring1 et al. (2016). O CMIP6 produz um conjunto de dados multimodelos de última geração projetado para avançar no conhecimento sobre a variabilidade climática e mudanças climáticas (DI LUCA; PITMAN; ELÍA, 2020). Os dados dos GCMs (Tabela 4.2) foram interpolados para a mesma resolução

horizontal (uma única grade de latitude-longitude) comum com resolução de $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ (Figura 4.1a) utilizando a interpolação bilinear.

Tabela 4.2 – Lista dos 35 GCMs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 SSP5-8.5.

(continua)

Nº	MODELOS	PAÍS	REFERENCIA
1	ACCESS-CM2	Austrália	Bi et al. (2020)
2	ACCESS-ESM1-5	Austrália	Ziehn et al. (2020)
3	AWI-CM-1-1-MR	Alemanha	Semmler et al. (2017)
4	BCC-CSM2-MR	China	Wu et al. (2018)
5	CAMS-CSM1-0	China	Rong (2019)
6	CanESM5-CanOE	Canadá	Swart et al. (2020)
7	CanESM5	Canadá	Swart et al. (2019)
8	CESM2	USA	Danabasoglu (2019a)
9	CESM2-WACCM	USA	Danabasoglu (2019b)
10	CIESM	China	Huang; Wenyu (2019)
11	CMCC-CM2-SR5	Itália	Lovato e Peano (2020)
12	CNRM-CM6-1	França	Voltaire et al. (2019)
13	CNRM-CM6-1-HR	França	Voltaire et al. (2019)
14	CNRM-ESM2-1	França	Séférián et al. (2019)
15	EC-Earth3	Europa	Massonnet et al. (2020)
16	EC-Earth3-Veg	Europa	EC-EarthConsortium (2019a)
17	FGOALS-f3-L	China	He et al. (2019)
18	FGOALS-g3	China	Li et al. (2019)
19	FIO-ESM-2-0	China	Song et al. (2020)
20	GFDL-CM4	Estados Unidos	Guo et al. (2018)
21	GFDL-ESM4	Estados Unidos	Krasting et al. (2019)
22	GISS-E2-1-G	Estados Unidos	Kelley et al. (2020)
23	HadGEM3-GC31-LL	Reino Unido	Ridley et al. (2019)
24	INM-CM4-8	Rússia	Volodin et al. (2019a)
25	INM-CM5-0	Rússia	Volodin et al. (2019b)
26	IPSL-CM6A-LR	França	Boucher et al. (2018)
27	KACE-1-0-G	Coreia	Byun et al. (2019)

(Conclusão)

Nº	MODELOS	PAÍS	REFERENCIA
29	MIROC-ES2L	Japão	Hajima et al. (2020)
30	MPI-ESM1-2-HR	Alemanha	Jungclaus et al. (2019)
31	MPI-ESM1-2-LR	Alemanha	Wieners et al. (2019)
32	MRI-ESM2-0	Japão	Yukimoto et al. (2019)
33	NESM3	China	Cao et al. (2018)
34	NorESM2-MM	Noruega	Bentsen et al.(2019)
35	UKESM1-0-LL	Reino Unido	Tang et al. (2019)

Tais modelos se baseiam nos cenários de emissões (possível futuro do sistema humano-ambiente, incluindo uma narrativa com tendências qualitativas e projeções quantitativas) que avaliam as mudanças climáticas: *Shared Socio-Economic Pathways – SSPs*, Tabela 4.2 (RIAHI et al., 2017). Esses cenários foram utilizados pelo IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) a partir do relatório (AR5). Neste estudo foram utilizados os cenários SSP2-4.5 (SSP245), projeções moderadas e SSP5-8.5 (SSP585) projeções pessimistas.

Tabela 4.3 Características principais dos cinco SSPs.

(continua)

MUDANÇAS SOCIO-ECONÔMICAS PARA MITIGAÇÃO	MUDANÇAS SOCIO-ECONÔMICAS PARA ADAPTAÇÃO		
	BAIXO	MÉDIO	ALTO
ALTO	<p>SSP5: Desenvolvimento com combustível fóssil</p> <ul style="list-style-type: none"> - Baixa população; -Crescimento económico per capita muito elevado; -Elevado desenvolvimento humano; -Alto progresso tecnológico; -Amplios recursos de combustíveis fósseis; -Estilos de vida muito intensivos em recursos; -Elevada procura de energia e alimentos per capita; 		<p>SSP3: Rivalidade regional</p> <ul style="list-style-type: none"> - Alta população; - Baixo crescimento económico per capita; -Baixo desenvolvimento humano; - Baixo progresso tecnológico; -Estilos de vida intensivos em recursos; -Procura de energia e de alimentos limitada em termos de recursos per capita; -Foco na segurança alimentar e energética regional; -Regionalização e falta de cooperação global.

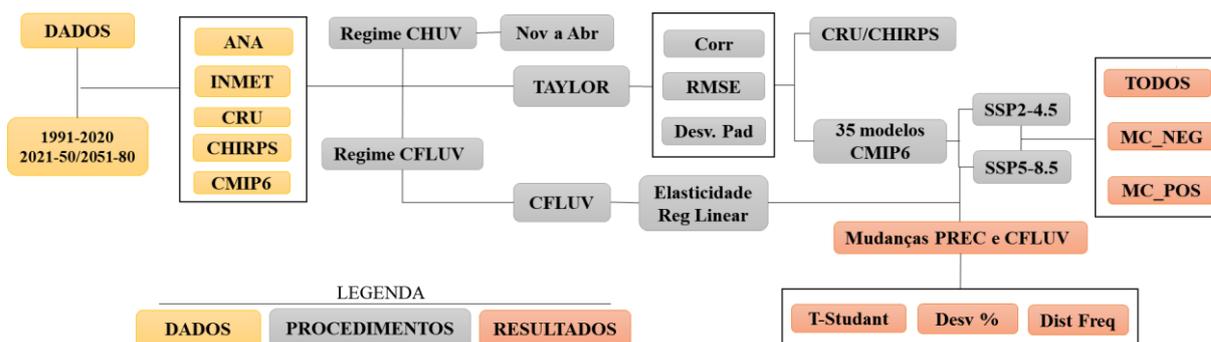
MUDANÇAS SOCIO-ECONÔMICAS PARA MITIGAÇÃO	MUDANÇAS SOCIO-ECONÔMICAS PARA ADAPTAÇÃO		
	BAIXO	MÉDIO	ALTO
MÉDIO	-Convergência econômica e cooperação global.		
		SSP2: Meio da estrada - População média; -Crescimento econômico médio e desigual; -Desenvolvimento humano médio e desigual; -Progressos tecnológicos médios e desiguais; -Estilos de vida intensivos em recursos; -Procura média e desigual de energia e alimentos per capita; -Cooperação global limitada e convergência econômica.	
BAIXO	SSP1: Desenvolvimento sustentável - Baixa população; -Elevado crescimento econômico per capita; -Elevado desenvolvimento humano; - Alto progresso tecnológico; -Tecnológica e ambiental orientada a mudança de comportamento; -Estilos de vida eficientes em termos de recursos; -Baixa procura de energia e alimentos per capita; -Convergência econômica e cooperação global.		SSP4: Desigualdade - População média a alta; - Crescimento econômico desigual de baixo a médio per capita; -Desenvolvimento humano desigual de baixo a médio; -Progresso tecnológico desigual: alto nos setores globalizados de alta tecnologia, lento nos setores domésticos; -Estilos de vida desiguais e consumo de energia/alimentação: intensidade de recursos em função dos rendimentos; -Elite mundialmente conectada, forças de trabalho doméstico desconectada;

Fonte: Adaptado de O'Neill et al. (2017).

4.2.2 Metodologia

Pesquisas definem o regime chuvoso da América do Sul e Amazônia para os meses de outubro a abril (SAPUCCI et al., 2022; SANTOS; BLANCO; OLIVEIRA JÚNIOR, 2019) ou de outubro a março (ALMAZROUI et al., 2021). Como não há uma definição unificada da estação chuvosa, decidiu-se por definir o regime sazonal da bacia do rio Tapajós, e para isso, calculou-se a média climatológica da precipitação, assim os meses com dados acima dessa média foram considerados como regime chuvoso (CHUV). Além disso, calculou-se os percentuais mensais para verificar o percentual que representa o regime CHUV. A Figura 4.2 mostra o resumo da metodologia utilizada neste estudo.

Figura 4.2- Fluxograma do resumo da metodologia utilizada para avaliar os impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso da bacia do Tapajós.



Em seguida buscou-se bases observacionais em ponto de grade que se adequassem aos dados *in situ*, pois a Amazônia, em geral, não possui estações de superfície que cubram de maneira satisfatória. Estudos científicos comprovam que a Amazônia é carente de dados de estações por vários motivos, e uma maneira de suprir essa carência são os estudos utilizando dados de outras formas de monitoramento como os dados em ponto de grade (JIAO et al, 2021; KUMAR et al., 2021; SHEN et al., 2019; VEGA-DURÁN et al, 2021; SILVA et al, 2019; COSTA et al., 2019; SILVA et al., 2022; SANTOS et al., 2019). Assim, foram inseridas três caixas sobre a bacia a fim de recortar o dado e calcular a média da variável (PREC) e obter os padrões espaciais dos dados observados em pontos de grade. Para a escolha das bases de dados utilizou-se os seguintes métodos estatísticos:

- Erro Médio Quadrático (RMSE) - Mede o erro existente entre dois conjuntos de dados (WILKS, 2011).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (4.1)$$

Onde: P é o dado previsto O é dado observado

- Coeficiente de correlação (r) (ro,p) - Mede o grau da correlação entre duas variáveis de escala métrica (Equação 4.2). Este coeficiente, normalmente representado por ρ assume apenas valores entre -1 e 1 (WILKS, 2011).

$$r_{o,p} = \frac{Cov(o,p)}{\sigma o} \quad (4.2)$$

- Desvio padrão normalizado (σ_n) de precipitação e cota fluviométrica entre os dados de estação de clima presente e futuro, equação 4.3.

$$P_n = \left[\frac{X - \bar{X}}{\sigma} \right] x \left[\frac{\sigma}{\bar{X}} \right] \quad (4.3)$$

Sendo: X o valor observado, \bar{X} a média histórica, e σ o desvio padrão da série temporal (SILVA, 2010).

Em seguida, o diagrama de Taylor, descrito em (TAYLOR, 2001), foi plotado para sintetizar e interpretar todos os resultados, com os seguintes critérios: a correlação deve ser positiva e > 0.2 ; $RMSE < 1.5$ e, o desvio padrão normalizado 0.25 . A base de dados em grade com o melhor resultado de validação foi utilizada nas análises de PREC para a região da bacia do Tapajós.

Para o estudo do clima futuro, utilizou-se 35 modelos do CMIP6 (Tabela 4.3), sendo aplicada metodologia similar à da escolha dos dados em pontos de grade visando encontrar modelos condizentes com o clima presente da bacia do rio Tapajós. Posteriormente foi feito o *ensemble* (descrito em Araújo; New, 2007), de todos os modelos (TODOS), bem como dos melhores conjuntos (MC_POS e MC_NEG) com precipitação positiva (modelos que simulam um aumento da PREC, MC_POS) e negativa (modelos que simulam diminuição da PREC,

MC_NEG) para analisar os padrões de mudanças da PREC considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os dois períodos futuros de 30 anos: 2021 a 2050 e 2051 a 2080.

Na análise de mudança nos padrões da cota fluviométrica, em função da mudança da precipitação, foi aplicado o método de elasticidade (sensibilidade do fluxo hidrológico a flutuações climáticas a longo prazo, onde tal alteração é em função à alteração de al (4.4) variável climatológica, como a PREC) adaptada de Deusdará-Leal et al. (2022). A elasticidade (ϵ) está definida na equação 4.4.

$$\epsilon (P, C) = \left(\frac{dC/C}{dP/P} \right) = \left(\frac{dC}{dP} \frac{P}{C} \right)$$

Sendo: C, se refere a cota fluviométrica e P, se refere a PREC.

E para investigar a mudança no regime da cheia sazonal no clima futuro utilizou-se o método do modelo de regressão linear (estabelece a relação estatística entre uma resposta de uma variável dependente a partir de uma ou mais variáveis explicativas ou independentes). Esse método utiliza os parâmetros intercepto e pares de coeficientes que minimizam a soma residual dos quadrados dos valores estimados. A regressão linear pode ser calculada de forma simples (utiliza apenas uma variável explicativa) ou múltipla (utiliza a partir de duas variáveis explicativas). Foi aplicada a regressão linear simples (equação 4.5).

(4.5)

$$\Delta C = \alpha + \epsilon p * \Delta P$$

Onde: Δ é a variação percentual de mudança da cota (C) e da PREC (P).

Para validar a mudança (se as médias do clima futuro são diferentes do clima presente) da PREC e CFLUV utilizou-se o teste T- *Student* (BUSSAM; MORETTIN, 2006), um dos métodos mais usados entre amostras. Utilizado para verificar se as médias aritméticas de distintas amostras podem ser consideradas diferentes a um dado nível de significância pré-estabelecido (neste estudo foram utilizados os níveis de significâncias de 90 e 95%), como mostrado na equação 4.6.

(4.6)

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) \cdot S_2^2}{(n_1 + n_2) - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

Onde: \bar{X} corresponde à média de cada série; n o número de observações; S^2 a variância e $(n_1 + n_2) - 2$ o grau de liberdade.

Além do teste T – *Student* na avaliação da mudança do clima futuro em relação ao clima presente, calculou-se também o desvio percentual, expressa por $((V_f - V_i)/V_i) * 100$, em que V_f é o valor final e V_i o valor inicial, ambos representando o valor do quantil da linha de base (WESCHENFELDER et al., 2019).

A distribuição de frequência relativa - razão entre a frequência simples (f_i) de cada classe e a frequência total ou soma das frequências simples ($\sum f_i$), equação 4.7 (PINTO; SILVA, 2020) - da PREC e da CFLUV para o clima presente e indicação dos cenários de clima futuro, foi aplicada a fim de obter uma análise dos impactos que a mudança climática pode causar nos extremos mínimos e máximos da precipitação do regime chuvoso e da cota fluviométrica nos modelos com indicativos de precipitação positiva (MC_POS) e negativa (MC_NEG).

$$fr_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (4.7)$$

4.4 Resultados

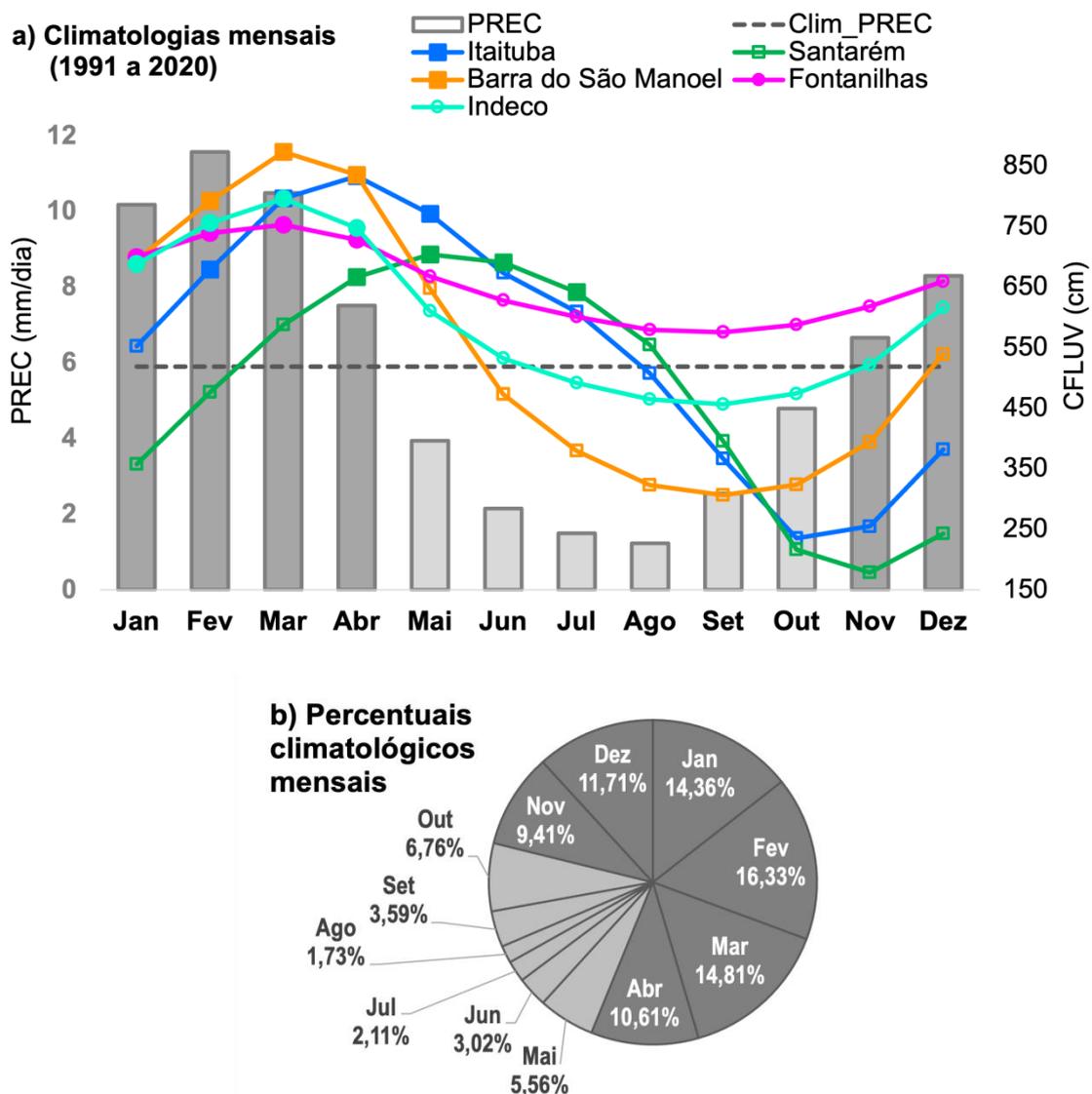
4.4.1 Ciclo climatológico anual do regime chuvoso e de cheia sazonal

A Figura 4.3 apresenta o ciclo anual da precipitação (PREC), a climatologia (Clim_PREC) e a cheia sazonal das cinco estações fluviométricas localizadas na bacia do rio Tapajós, bem como os percentuais climatológicos mensais.

Na Figura 4.3 a nota-se um ciclo anual bem definido no qual, os meses de novembro a abril apresentam precipitação acima de 6 mm/dia, portanto o regime chuvoso (maior volume ~12 mm/dia em fevereiro), com percentual acima 77% de todo o volume anual de PREC sobre a bacia (Figura 4.3 b)

Quanto ao regime de cotas, observa-se que as estações de Santarém, Itaituba e Barra de São Manuel mostram uma sazonalidade do regime hidrológico bem pronunciado de cheia e vazante, diferente das estações Indeco e Fontanilhas que não possuem essa característica, além de possuírem uma menor amplitude. Além disso, nota-se que há um diferencial da cheia da cota (quatro meses com maior cota) entre as estações posicionadas na bacia, pois Santarém apresenta o pico nos meses de abril a julho, Itaituba de fevereiro a maio, enquanto Barra de São Manuel, Fontanilhas e Indeco de janeiro a abril.

Figura 4.3- a) Climatologia mensal da precipitação e ciclo anual da cota fluviométrica e b) percentual mensal da precipitação para o período de 1991 a 2020.



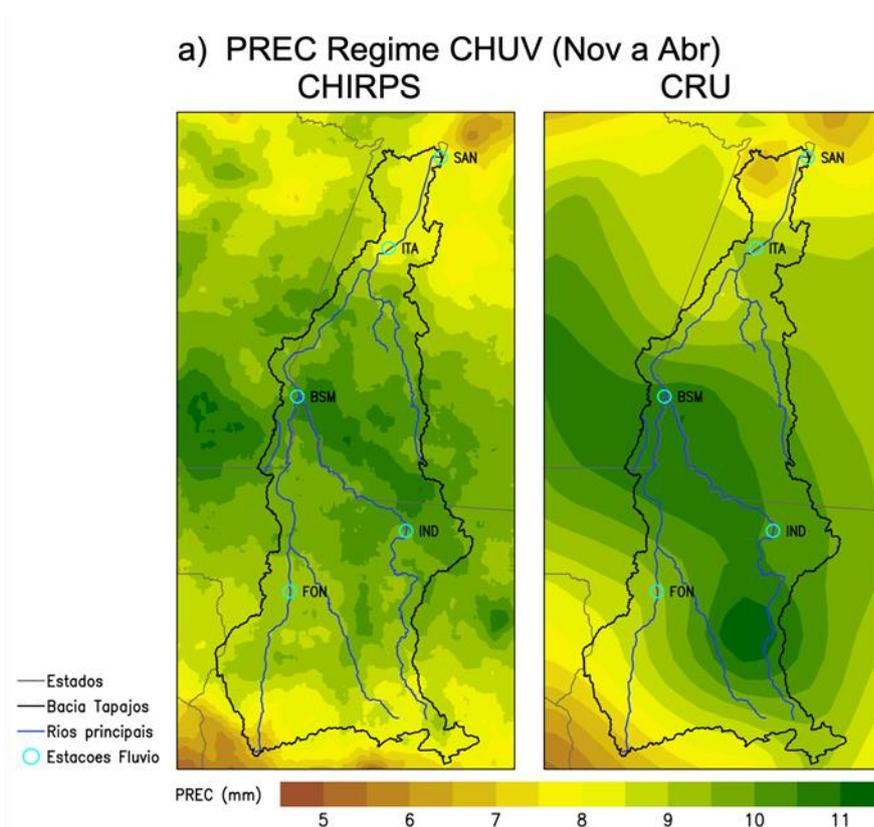
4.4.2 Padrões climatológicos da precipitação e cota no regime chuvoso do clima atual

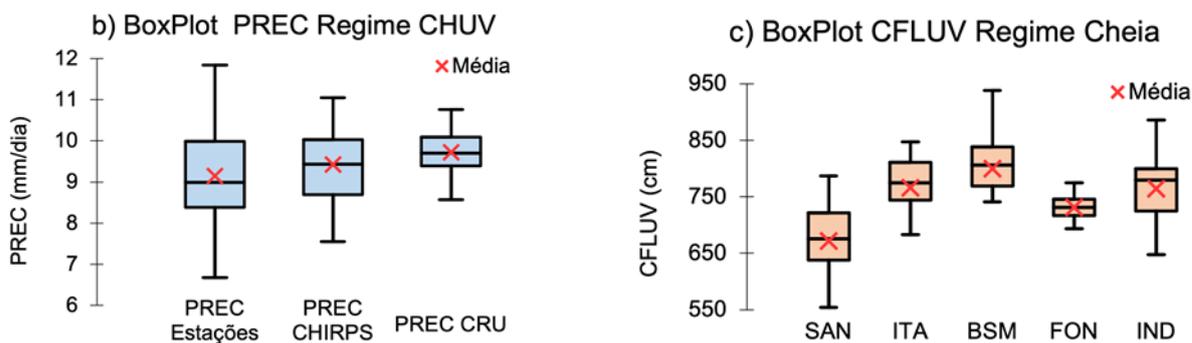
A configuração espacial dos dados em ponto de grade (CHIRPS e CRU), no regime CHUV (Nov a Abr) é apresentada na Figura 4.4 a). Os dados mostram um padrão semelhante, com os maiores volumes localizados na região central da bacia (até 11 mm/dia) e os menores nas cabeceiras e na foz, com volume de 9 mm/dia, e para o CRU um volume de 6mm/dia na região da foz. Na comparação entre as médias das dez estações localizadas na bacia e os dados

em ponto de grade (Figura 4.4b) é perceptível que o CHIRPS tem variabilidade mais consistente com os dados da média das estações.

O regime fluviométrico de cheia mostrado nos boxplots (Figura 4.4c) acompanha a variabilidade do volume de precipitação, em que as menores médias da cota estão nas estações localizadas mais sul e ao norte da bacia como são exposto em Santarém (SAN), que apresenta uma variação da cota entre 550 e 800 cm e média de 670 cm e Fontanilhas (FON) com menor variação (entre 680 e 770 cm, média de 700 cm), enquanto que Itaituba (ITA), Barra de São Manuel (BSM) e Indeco (IND) exibem médias acima 750 cm e cota máxima de aproximadamente 950 cm (BSM).

Figura 4.4- Padrões climatológicos (1991 a 2020) da PREC no regime CHUV na bacia do Tapajós com os dados do CHIRPS e CRU, b) BoxPlot da PREC média na bacia nos dados das estações, CHIRPS e CRU, c) BoxPlot da CFLUV do regime de cheia nas cinco estações fluviométricas

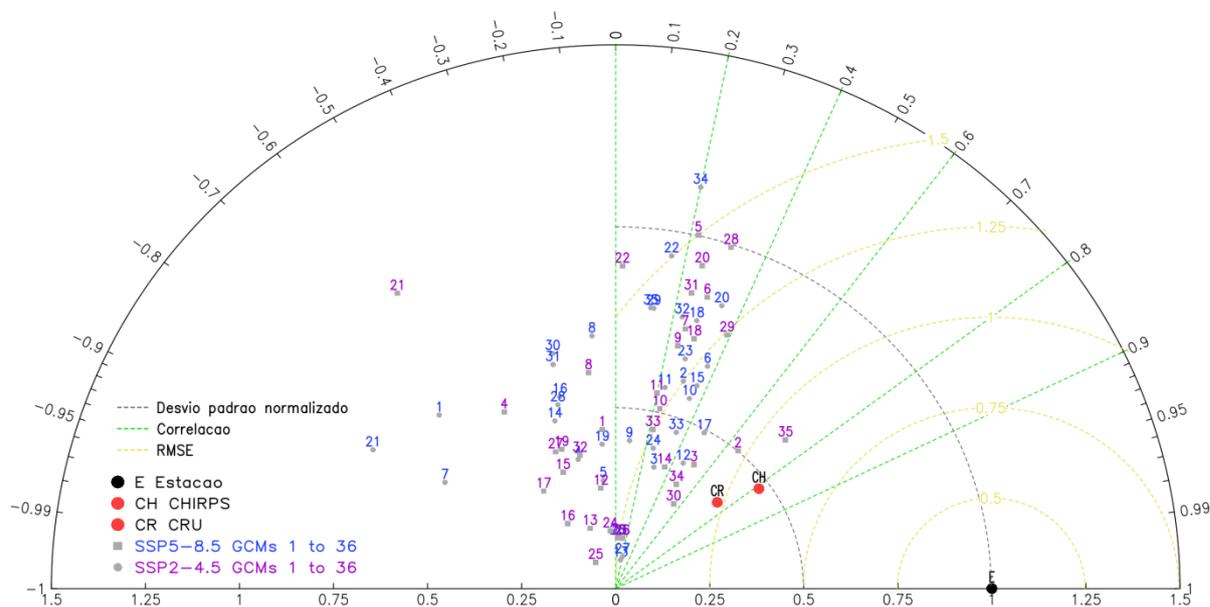




No que concerne à variável precipitação, a verificação da melhor base observacional e dos modelos do CMIP6 do clima futuro (nos cenários SSP2-4.5, em roxo e SSP5-8.5, em azul) que são condizentes com o clima presente da bacia do Tapajós, é baseada nos critérios de melhor correlação (linha em verde), menor erro (linha em amarelo) e desvio padrão normalizado (linha em preto) entre as bases observacionais das estações, CHIRPS e CRU com os GCMs do CMIP6, são apresentados no diagrama de Taylor (Figura 4.5).

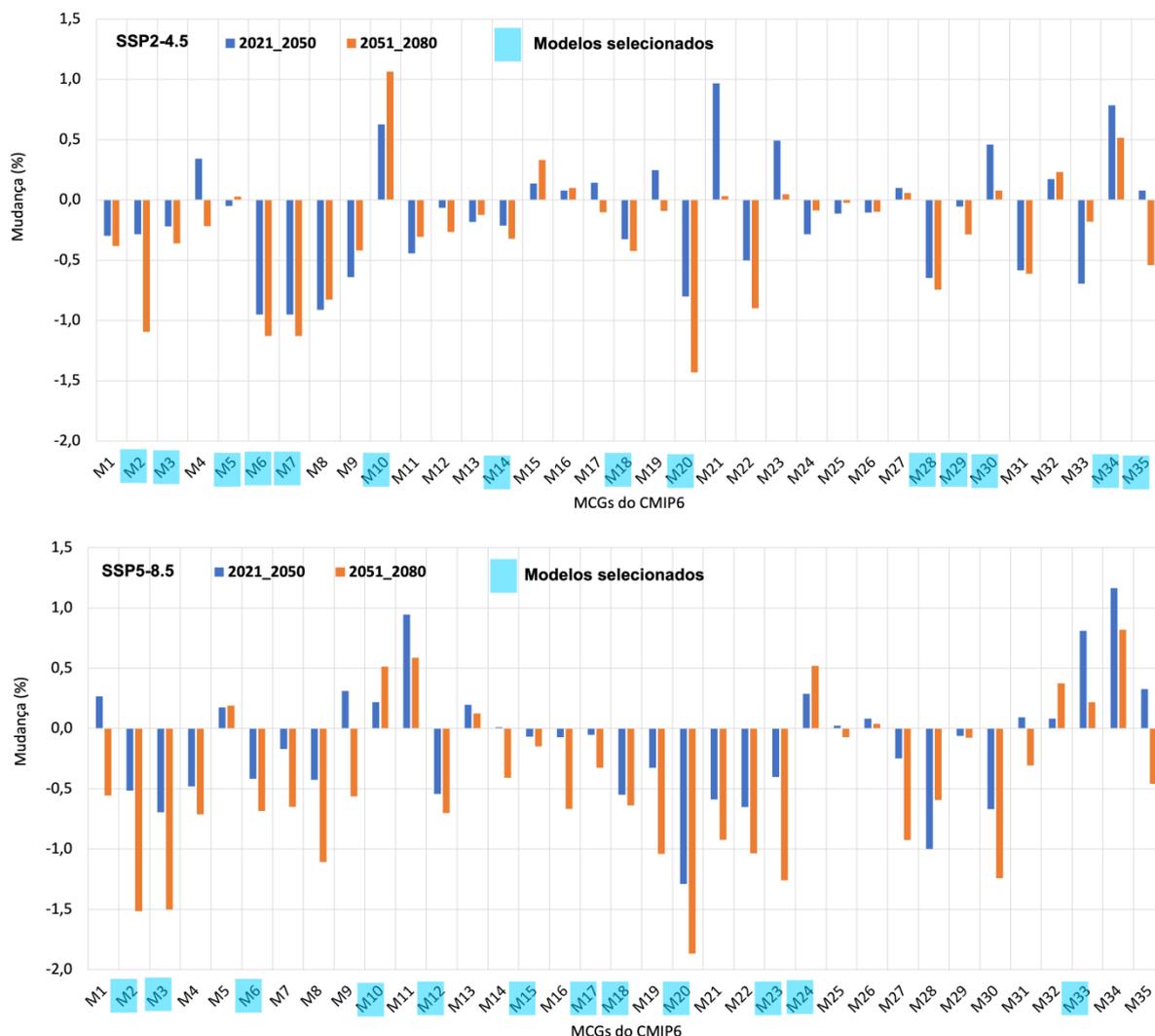
O dado observacional (em ponto de grade) que mais se aproxima do dado de estação (E) para o regime chuvoso é o CHIRPS (CH) com correlação acima de 0.8, o CRU apresentou correlação de 0.7. Quanto aos GCMs selecionados para ser feito um novo *ensemble*, foram considerados como melhores modelos os que estão posicionados na região com melhor relação de desvio padrão normalizado (>0.25), melhor correlação (0.2) e menor RMSE (<1.5).

Figura 4.5- Diagrama de Taylor da PREC do regime CHUV considerando os dados observados (Estações, CHIRPS e CRU) e simulados pelos 35 MCGs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5



A escolha dos modelos que melhor representam o clima presente através do diagrama de Taylor (Figura 4.5) remetem a modelos que apresentam indicações de aumento e diminuição da precipitação na bacia. Apesar de grande parte dos modelos mostrarem diminuição da precipitação, optou-se por fazer *ensemble* dos modelos (para os cenários moderado e pessimista, para os períodos de 2021_2050 e 2051_2080) para as duas indicações de mudanças na PREC (Figura 4.6). Nas composições dos modelos, foram escolhidos quatorze modelos do cenário SSP2-4.5 e doze do cenário SSP5-8.5. Os modelos do cenário SSP5-8.5 mostram os maiores valores de taxa de mudança principalmente a negativa (= ou > a -1,5).

Figura 4.6- Mudança % da PREC do regime CHUV na bacia do Tapajós simulados pelos 35 MCGs do CMIP6 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 nos dois períodos de 30 anos do clima futuro de 2021_2050 e 2051_2080.



4.4.3 Precipitação simulada e impactos na cota fluviométrica

Os resultados das composições dos padrões espaciais das mudanças (%) dos *ensembles* de todos os modelos (TODOS), dos modelos com indicação de mudança positiva (MC_POS) e negativa (MC_NEG) de precipitação no regime chuvoso são apresentados na Figura 4.7.

Nos padrões utilizando todos os modelos (TODOS), é perceptível que a intensidade da mudança aumenta conforme a aproximação ao final do século (segundo período do clima

futuro) e mostram mudança de precipitação negativa na bacia, principalmente na região norte da bacia (médio baixo Tapajós).

No *ensemble* dos melhores modelos de efeito de mudança negativa de PREC (MC_NEG), observa-se uma certa homogeneidade no sinal nos dois cenários e períodos, apesar de mostrar uma diminuição maior no cenário SSP2-4.5 no médio alto Tapajós no período de 2021-2050. Já no período de 2051-2080 a mudança é mais perceptível no médio baixo Tapajós, no cenário pessimista (SSP5-8.5).

Nos modelos com indicação positiva de PREC (MC_POS), o cenário SSP2-4.5 mostra aumento em toda a bacia, especialmente no médio baixo Tapajós (2021-2050), por outro lado, no cenário SSP5-8.5, o sinal de mudança não é homogêneo, já que apresenta uma área negativa na região noroeste da bacia (sudoeste do Estado do Pará) intensificando no segundo período (2051-2080). No geral, notam-se que haverá mudanças mais significativas no médio baixo Tapajós.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados estatísticos da diferença da média entre o clima futuro e presente da precipitação (média das estações) e cota nas estações de SAN, ITA e BSM, para os dois cenários e períodos estudados.

Todos os resultados relacionados a PREC mostram estatisticamente que haverá mudança nos padrões de chuva da bacia, pois os valores do p-valor apresentam significância estatística nos cenários e períodos em questão, principalmente no cenário moderado, porque mostra valores com maior significância (95%).

Quanto ao impacto na cota de cheia das estações, observam-se relevância estatística nas três estações de SAN, BSM e ITA, porém nas duas primeiras o impacto da mudança da PREC na cota ocorrerá principalmente quando levado em consideração o cenário SSP2-4.5. Em relação ao impacto no regime de cheia em ITA, nota-se que esta região será a mais influenciada pelas mudanças climáticas globais nos cenários futuros. As estações de FON e IND não apresentaram resultados com relevância estatística por isso não foram mostrados.

Figura 4.7- Padrões espaciais das mudanças (%) da PREC do regime chuvoso considerando os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para os dois períodos futuros de 30 anos 2021 a 2050 e 2051 a 2080.

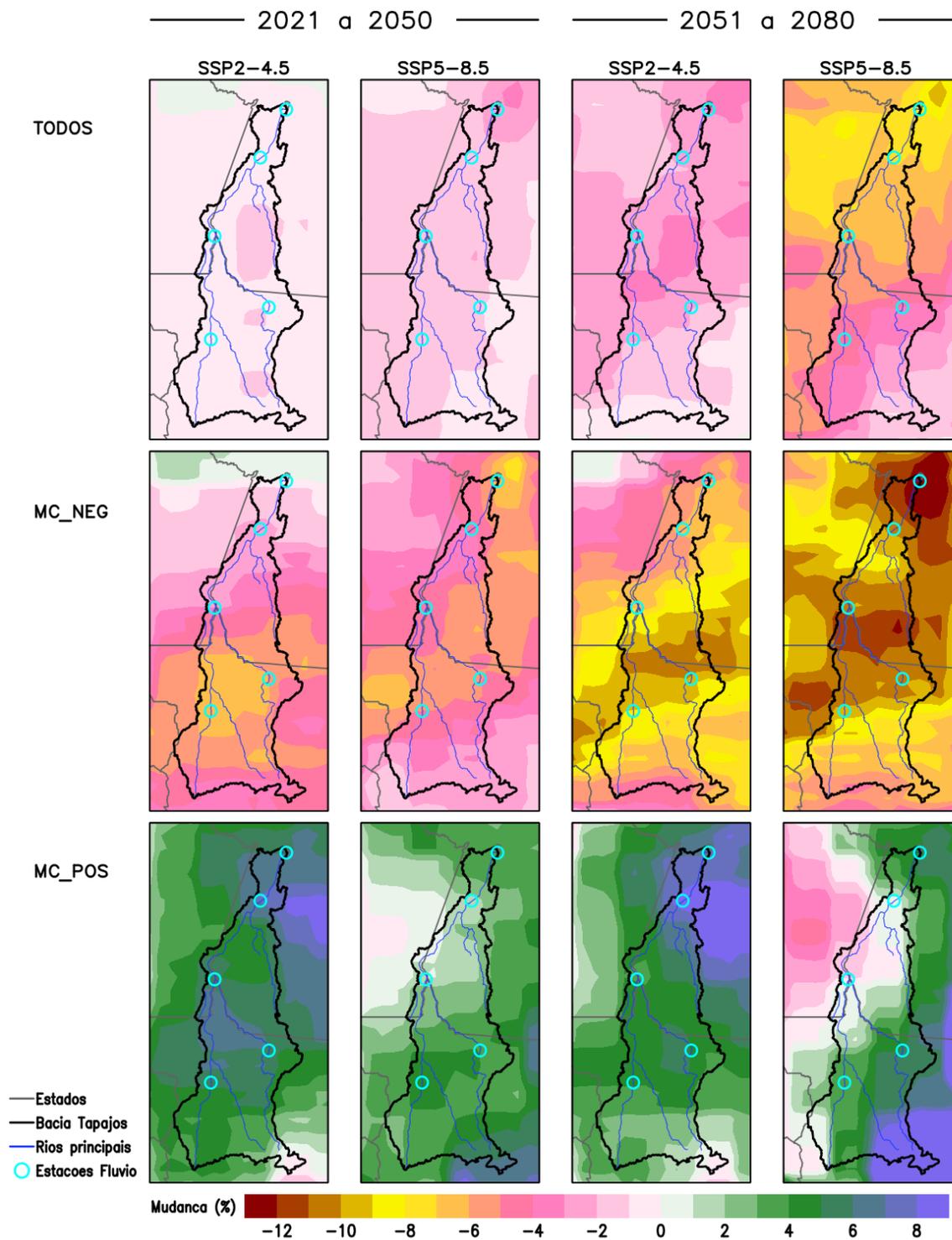


Tabela 4.4- Teste-t de Student da diferença das médias entre o clima futuro (2021-2050 e 2050-2080) e clima presente (1991-2020) da PREC e CFLUV. Sendo: valores em verde (95%) e em laranja (99%) de confiança.

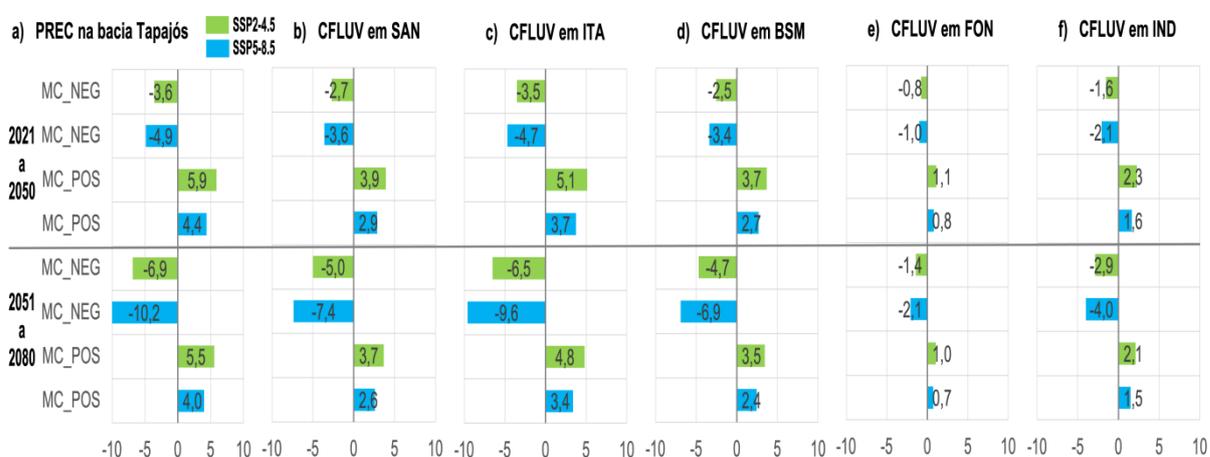
Variável e cenários futuros		Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Diferença	p-valor	
PREC na bacia Tapajós	Clima presente	7,556	11,052	9,404	0,819			
	SSP2-4.5	MC-NEG 2021_2050	8,267	9,828	9,066	0,325	0,338	0,043
		MC-NEG 2051_2080	8,013	9,487	8,757	0,323	0,647	0,001
		MC-POS 2021_2050	8,974	10,906	9,958	0,512	-0,554	0,002
		MC-POS 2051_2080	9,261	10,494	9,925	0,345	-0,521	0,001
	SSP5-8.5	MC-NEG 2021_2050	8,028	9,970	8,946	0,449	0,458	0,012
		MC-NEG 2051_2080	7,496	9,212	8,442	0,414	0,962	< 0,0001
		MC-POS 2021_2050	8,986	10,615	9,815	0,362	-0,412	0,011
		MC-POS 2051_2080	8,648	10,810	9,779	0,514	-0,375	0,041
CFLUV em SAN	Clima presente	471,750	787,000	671,800	69,459			
	SSP2-4.5	MC-NEG 2021_2050	613,704	691,853	653,686	16,243	18,114	0,213
		MC-NEG 2051_2080	600,962	674,776	638,214	16,161	33,586	0,015
		MC-POS 2021_2050	649,092	745,795	698,340	25,640	-26,540	0,049
		MC-POS 2051_2080	663,459	725,146	696,675	17,259	-24,875	0,071
	SSP5-8.5	MC-NEG 2021_2050	601,712	698,936	647,668	22,477	24,132	0,086
		MC-NEG 2051_2080	575,091	661,013	622,433	20,712	49,367	0,001
		MC-POS 2021_2050	649,704	731,226	691,200	18,127	-19,400	0,145
		MC-POS 2051_2080	632,784	740,999	689,380	25,716	-17,580	0,225
CFLUV em ITA	Clima presente	550,750	941,500	765,792	77,131			
	SSP2-4.5	MC-NEG 2021_2050	679,515	795,524	738,867	24,113	26,924	0,087
		MC-NEG 2051_2080	660,600	770,174	715,900	23,990	49,891	0,001
		MC-POS 2021_2050	732,048	875,599	805,155	38,061	-39,363	0,020
		MC-POS 2051_2080	753,375	844,947	802,683	25,621	-36,892	0,019
	SSP5-8.5	MC-NEG 2021_2050	661,714	806,039	729,933	33,366	35,859	0,032
		MC-NEG 2051_2080	622,195	749,744	692,474	30,746	73,318	< 0,0001
		MC-POS 2021_2050	732,956	853,973	794,556	26,909	-28,764	0,068
		MC-POS 2051_2080	707,839	868,480	791,853	38,175	-26,062	0,133
CFLUV em BSM	Clima presente	617,500	944,000	799,494	72,952			
	SSP2-4.5	MC-NEG 2021_2050	734,593	821,842	779,231	18,135	20,263	0,159
		MC-NEG 2051_2080	720,367	802,777	761,958	18,043	37,537	0,008
		MC-POS 2021_2050	774,102	882,066	829,086	28,626	-29,591	0,045
		MC-POS 2051_2080	790,142	859,013	827,227	19,269	-27,732	0,058
	SSP5-8.5	MC-NEG 2021_2050	721,205	829,751	772,512	25,094	26,983	0,078
		MC-NEG 2051_2080	691,483	787,411	744,339	23,124	55,156	0,000
		MC-POS 2021_2050	774,785	865,802	821,114	20,238	-21,620	0,126
		MC-POS 2051_2080	755,895	876,712	819,082	28,711	-19,587	0,212

Na Figura 4.8 é demonstrado o desvio percentual da mudança do clima futuro em relação ao clima presente da precipitação e da cota fluviométrica, nos cenários SSP2-4.5 (em verde) e SSP5-8.5 (em azul), para os modelos MC_NEG e MC_POS e períodos 2021-2050 e 2051-2080.

Os resultados mostram alto desvio percentual da PREC evidenciando que esta variável sofrerá mudança no clima futuro (nos dois cenários), seja de aumento ou diminuição. A evidência é maior no MC_NEG e para o período mais próximo do final do século, porém observa-se um desvio percentual significativo no MC_POS. Havendo mudança na PREC, a

cota de cheia também será impactada já que o efeito é direto. Assim, notam-se que as estações localizadas mais próximas das cabeceiras, no Estado do Mato Grosso (IND e FON) não apresentam desvio percentual significativo, por outro lado, nas estações localizadas no rio Tapajós (BSM, SAN e ITA), os valores de mudança percentual são significativos principalmente no MC_NEG e no cenário SSP5-8.5, demonstrando possível diminuição da cota fluviométrica na região.

Figura 4.8- Desvio percentual da mudança do clima futuro em relação ao clima presente da PREC e CFLUV.



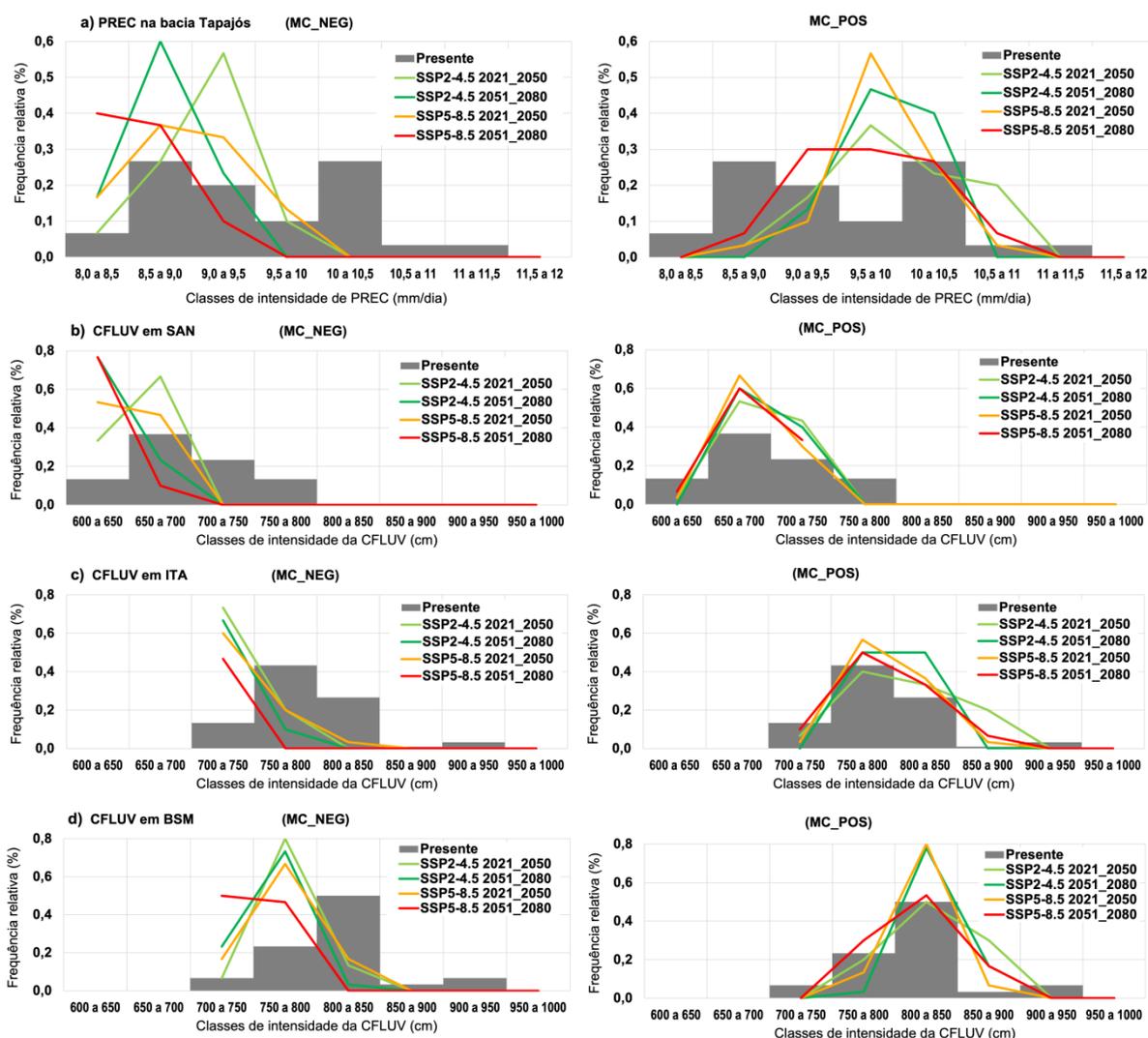
A distribuição de frequência de extremos máximos e mínimos da PREC e da CFLUV no regime chuvoso está exposta na Figura 4.9.

No MC_NEG da PREC (Figura 4.9a) notam-se que as classes 8,5 a 9,0 e 9,0 a 9,5 mm/dia, demonstram diminuição nos dois cenários, sendo maior no SSP2-4.5 e para o período 2051-2080. Quanto ao MC_POS (Figura 4.9b), percebe-se que haverá aumento na frequência da precipitação para as classes com 9,5 a 10,0 e de 10,0 a 10,5 mm/dia no cenário SSP5-8.5, no período 2021-2050. Os modelos demonstram tanto aumento como diminuição de PREC, porém nota-se que a frequência relativa de extremos máximos é superior para os modelos MC_NEG.

Como a PREC é diretamente proporcional a CFLUV observa-se que as frequências das classes com os máximos e mínimos da cota nas estações que serão impactadas com o aumento e diminuição da PREC, porém em maior proporção nos extremos máximos de diminuição (MC_NEG) de cota nas três estações no período mais atual (2021-2050) e no cenário SSP2-4.5.

Porém, no modelo MC_POS, observam-se aumento nas classes de maior intensidade da cota, com destaque para a estação de BSM.

Figura 4.9- Distribuição de frequência de extremos máximos e mínimos de PREC e CFLUV. Sendo: barras em cinza representam a PREC e CFLUV no clima presente, as linhas em tons de verde o cenário SSP2-4.5 e as linhas em laranja e vermelho o cenário SSP5-8.5, para os dois períodos.



4.5 Discussão

Estudos voltados ao clima futuro na Amazônia vêm aumentando nas últimas décadas (MARENGO 2007; SOUZA et al., 2016; PARSONS, 2020) em decorrência do aumento de impactos das mudanças climáticas como por exemplo os extremos de seca e enchentes.

Os modelos climáticos, na simulação, necessitam de dados observados espaciais para a correção, sendo assim, como a quantidade de dados de estação de superfície não suprem as informações para esse tipo de estudo, faz-se necessário a utilização de bases de dados em ponto de grade. Nesta pesquisa foram comparadas duas bases em ponto de grade para definir qual seria compatível com os dados de estações e usada na correção dos modelos utilizados neste estudo. Os resultados apresentados demonstraram que o CHIRPS foi o que mais se assemelhou aos dados de estação. Silva et al. (2020) e Cavalcante et al. (2020) demonstraram que os dados de precipitação do CHIRPS se assemelham aos dados obtidos com os dados *in situ* para a região amazônica.

Quanto ao clima futuro, a maioria dos estudos relatam mudanças de aumento ou diminuição na variável meteorológica em questão. Aqui não foi demonstrado apenas um único resultado como geralmente são apresentados, mas procurou-se mostrar os resultados da utilização de *ensemble* de modelos que indiquem aumento e dos que indiquem diminuição de precipitação para os cenários moderado e pessimista sobre a bacia do rio Tapajós.

Os resultados comprovam que a bacia poderá vivenciar, nos dois cenários e períodos de trinta anos subsequentes, com indicativo de diminuição de precipitação quanto de aumento.

Nesse contexto, embora a média do conjunto do 5º Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP5) tenha tentado reproduzir a precipitação histórica da Amazônia de forma o mais próximo possível da observada (KNUTSON; ZENG, 2018) a simulação futura é incerta (SILVEIRA et al., 2013). A maioria dos modelos sugerem uma tendência de secagem modesta na bacia, porém as discrepâncias na direção e magnitude das mudanças futuras limitam a confiança nas projeções (BOISIER et al., 2015; CHADWICK et al., 2016)

Na última geração do projeto (CMIP6), os resultados não são diferentes, pois a maioria dos modelos mostram indicativo de diminuição nos volumes de precipitação da Amazônia central (BECKER et al., 2021; LLOPART et al., 2014; PARSONS, 2020), porém, não há consenso na academia (LUCAS, 2022) e estudos mostram que haverá aumento de precipitação na região (GUIMBERTEAU et al., 2017). O sexto relatório do IPCC comprova, através de estudos científico, que a temperatura atingirá 1,5°C, na maioria das regiões terrestre e oceânica, entre 2030 e 2052 se continuar a aumentar no ritmo atual. Para a precipitação, há alto nível de confiança de chuvas fortes em várias regiões e a probabilidade de déficits de seca e chuva em algumas regiões (médio nível de confiança) (MASSON-DELMOTTE et al., 2019).

Aqui foram utilizados três modelos para indicação de mudança no clima futuro: TODOS, MC_NEG e MC_POS, com ênfase nos modelos com indicação de mudança negativa e positiva, e desses, o MC_NEG demonstrou efeito direto de diminuição nos dois cenários e períodos estudados, porém, no MC_POS, no cenário SSP5-8.5, observou-se que haverá diminuição de PREC na região noroeste da bacia, mesmo usando *ensemble* de modelos positivos. Não foi levado em consideração, neste estudo, mas esse resultado pode ser devido a subestimação de alguns modelos do CMIP, em que estudos mostram tanto no CMIP5 (SILVEIRA et al., 2013) e CMIP6 (OLIVEIRA et al., 2023).

É fato que devido as mudanças climáticas haverá variação de extremos de seca e enchente no mundo e que afetarão vários setores, como a infraestrutura (FORZIERI et al., 2018), a produção agrícola (WATANABE et al., 2018; MCCARTHY et al. 2021), econômicos e sociais (MARENGO; ESPINOZA, 2016; PINHO; MARENGO; SMITH, 2015). Com isso, além do estudo do indicativo de mudança na precipitação no clima futuro, também foi investigado a mudança no regime de cheia, utilizando o método de elasticidade (regressão linear) em cinco estações ao longo da bacia. Estudos utilizando essa metodologia (ANDRÉASSIAN et al., 2016; FU; CHARLES; CHIEW, 2007; TANG; TANG; ZHANG, 2020), desenvolvida por Sankarasubramanian, Vogel e Limbrunner (2001), vem crescendo em pesquisas voltadas para prever os potenciais efeitos das mudanças climáticas na hidrologia.

Este estudo mostra que as mudanças e impactos mais significativos na cota fluviométrica serão nas estações localizadas no médio baixo Tapajós. Essa região apresenta grande pressão de degradação ambiental ao longo das últimas décadas como a construção de estradas para escoamento de grãos e a exploração mineral (BIERI; PICANÇO, 2019; SOUZA-FILHO et al., 2021).

Apesar do vasto conhecimento e das práticas no saber lidar com a variabilidade das secas e inundações causados pelos extremos na precipitação, comunidades da região amazônica padecem com diversas consequências: incêndios, diminuição da pesca em período de inundação, precariedade no transporte fluvial no baixo fluxo, etc (PINHO; MARENGO; SMITH, 2015). Assim como na precipitação, a maior parte dos estudos hidrológicos futuros para a Amazônia mostram diminuição na vazão, escoamento (FARINOSI et al., 2019; LUCAS et al., 2022) porém também mostram aumento (GUIMBERTEAU et al., 2017). Para a bacia do Tapajós, as pesquisas apresentam resultados de diminuição na vazão (FARINOSI et al., 2019) e aumento no escoamento em torno de 14% (GUIMBERTEAU et al., 2017)

Portanto, a bacia do Tapajós necessita de atenção para os possíveis impactos que as mudanças no clima futuro podem causar, especialmente para as regiões com maiores problemas socioambientais e para a população mais vulnerável que vive e sobrevive dos benefícios oferecidos pelos rios.

4.6 Conclusões

Considerando a avaliação dos impactos futuros das mudanças climáticas globais no regime chuvoso da precipitação e cotas de cheia sazonal da bacia do Tapajós na Amazônia central, evidenciamos os seguintes resultados:

Devido à falta de consenso da definição de um período chuvoso sobre a América do Sul e Amazônia, aqui foi definido como regime chuvoso da bacia do Tapajós os meses de novembro a abril. Além disso, na verificação da melhor base de dados em pontos de grade, o CHIRPS foi o que melhor representou a variabilidade do dado observado das estações.

Quanto a cota, os dados fluviométricos demonstram uma sazonalidade do regime hidrológico bem pronunciado de cheia e vazante com um atraso em relação a precipitação.

Na avaliação do clima futuro, optou-se por fazer o ensemble dos modelos com indicativos de negativo e positivo de mudança nos padrões de chuva, nos cenários intermediário e pessimista e não como comumente é feito, utilizando um único *ensemble* de todos os modelos. Todos os *ensembles* de melhores modelos demonstraram percentual de mudança na precipitação nos períodos e cenários em questão, com maior sinal para o cenário SSP5-8.5 e para o final do século. Tais mudanças foram comprovadas no teste com significância estatística, desvio percentual e distribuição de frequência de extremos máximos e mínimos.

Investigou-se a mudança dos impactos no regime de cheia sazonal em cinco estações fluviométricas. Assim como na precipitação, os resultados demonstram mudança, na cota não foi diferente, pois os resultados estatísticos, desvio percentual e na distribuição de frequência de extremos máximos e mínimos mostram que a cota de cheia na bacia do Tapajós será afetada pela mudança da precipitação, principalmente as estações localizadas do centro ao norte da bacia, e Itaituba será a mais influenciada pelas mudanças climáticas globais.

Com isso, os resultados obtidos para a bacia do rio Tapajós são relevantes e essenciais nas ações governamentais de política hídrica, pois podem auxiliar nas tarefas de planejamento de longo prazo e elaboração de estratégias para mitigar os riscos de extremos climáticos futuros.

REFERÊNCIAS

ALARCON, D. F.; MILLIKAN, B.; TORRES, M. **Ocekadi: hidrelétricas, conflitos socioambientais e resistência na Bacia do Tapajós**. Brasília, DF: International Rivers Brasil, 2016.

ALMAZROUI, M. *et al.* Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021.

ANDRÉASSIAN, Vazken *et al.* Climate elasticity of streamflow revisited—an elasticity index based on long-term hydrometeorological records. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 11, p. 4503-4524, 2016.

ANJOS, L. J. S. *et al.* Future projections for terrestrial biomes indicate widespread warming and moisture reduction in forests up to 2100 in South America. **Global Ecology and Conservation**, v. 25, p. e01441, 2021.

ARAUJO, I.; LIMA, A. M.; SANTOS, C. Caracterização hidrogeomorfológica das paisagens componentes da bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Enciclopédia Biosfera**, v. 11, n. 22, 2015.

ARAÚJO, MIGUEL B.; NEW, MARK. Ensemble forecasting of species distributions. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 22, n. 1, p. 42-47, 2007.

ASADIEH, BEHZAD; KRAKAUER, NIR Y. Global change in streamflow extremes under climate change over the 21st century. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 11, p. 5863-5874, 2017.

BAKER, J. C. A. *et al.* Robust Amazon precipitation projections in climate models that capture realistic land-atmosphere interactions. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 7, p. 074002, 2021.

BENTSEN, M. *et al.* NCC NorESM2-MM model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, v. 635, 2019.

BI, D. *et al.* Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian community climate and earth system simulator coupled model. **Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 70, n. 1, p. 225-251, 2020.

BOUCHER, O. *et al.* **IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. Version 20180803. Earth System Grid Federation. 2018.

BOISIER, J. P.; CIAIS, P.; DUCHARNE, A.; GUIMBERTEAU, M. Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations **Nature Climate Change**, v. 5, n. 7, p. 656-660, 2015.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.de; COLLISCHON, W.; BRAVO, J. M.; SIQUEIRA, V. A.; STEINKE, E. B. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, n. 4, p. 503-522, 2020.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. São Paulo: Editora Saraiva, 2002, 7ª tiragem. ISBN 85-02-0349-9, 2006.

BYUN, Y. H. *et al.* **NIMS-KMA KACE1**. 0-G model output prepared for CMIP6 CMIP historical, Version 20200601. 2019.

CAO, J. *et al.* The NUIST Earth System Model (NESM) version 3: description and preliminary evaluation. **Geoscientific Model Development**, v. 11, n. 7, p. 2975-2993, 2018.

CHADWICK, R. *et al.* Large rainfall changes consistently projected over substantial areas of tropical land. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 2, p. 177-181, 2016.

CHEN, H.; SUN, J.; CHEN, Xiaoli. Projection and uncertainty analysis of global precipitation-related extremes using CMIP5 models. **International journal of climatology**, v. 34, n. 8, p. 2730-2748, 2014.

CHENG, C. L.; GARG, G. Coefficient of determination for multiple measurement error models. **Journal of Multivariate Analysis**, v. 126, p. 137-152, 2014.

COOK, B. I. *et al.* Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. **Earth's Future**, v. 8, n. 6, p. e2019EF001461, 2020.

DANABASOGLU, G. *et al.* The community earth system model version 2 (CESM2). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 2, p. e2019MS001916, 2020.

DEUSDARÁ-LEAL, K. *et al.* Trends and climate elasticity of streamflow in South-Eastern Brazil Basins. **Water**, v. 14, n. 14, p. 2245, 2022.

DI LUCA, A.; PITMAN, A. J.; ELÍA, R. de. Decomposing temperature extremes errors in CMIP5 and CMIP6 models. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 14, p. e2020GL088031, 2020.

EC-EARTH CONSORTIUM *et al.* **EC-Earth-Consortium EC-Earth3-Veg model output prepared for CMIP6 CMIP historical**. [S.l.:s.n], 2019.

FEARNSIDE, P. M. Uso da terra na Amazônia e as mudanças climáticas globais. **Destruição e Conservação da Floresta Amazônica**, v. 1, p. 21-38, 2022.

FORZIERI, G. *et al.* Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 97-107, 2018.

FU, G.; CHARLES, S. P.; CHIEW, F. HS. A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. **Water Resources Research**, v. 43, n. 11, 2007.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Regionalization of climate change simulations for the assessment of impacts on precipitation, flow rate and electricity generation in the Xingu river basin in the Brazilian Amazon. **Energies**, v. 15, n. 20, p. 7698, 2022.

FARINOSI, F. *et al.* Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajos Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, v. 7, n. 8, p. 993-1017, 2019.

FEARNSIDE, P. M. Amazon forest maintenance as a source of environmental services. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, p. 101-114, 2008.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FOLEY, J. A. *et al.* El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, p. 79-1-79-20, 2002.

GUO, H. *et al.* NOAA-GFDL GFDL-CM4 model output historical. **Earth System Grid Federation**, v. 10, 2018.

GUIMBERTEAU, M. *et al.* Impacts of future deforestation and climate change on the hydrology of the Amazon Basin: a multi-model analysis with a new set of land-cover change scenarios. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1455-1475, 2017.

HAJIMA, T. *et al.* Development of the MIROC-ES2L Earth system model and the evaluation of biogeochemical processes and feedbacks. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 5, p. 2197-2244, 2020.

HARRIS, I. P. D. J. *et al.* Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. **International journal of climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642, 2014.

HARRIS, I. *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020.

HE, B. *et al.* CAS FGOALS-f3-L model datasets for CMIP6 historical atmospheric model intercomparison project simulation. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 36, n. 8, p. 771-778, 2019.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J. R.; SMITH, Richard A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water Resources Research**, v. 18, n. 1, p. 107-121, 1982.

HSU, K. *et al.* Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 36, n. 9, p. 1176-1190, 1997.

HUANG, W. **IPCC DDC**: THU CIESM model output prepared for CMIP6 CMIP. [S.l.:s.n.], 2019.

JOYCE, R. J. *et al.* CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. **Journal of hydrometeorology**, v. 5, n. 3, p. 487-503, 2004.

- JUNGCLAUS, J. *et al.* MPI-M MPI-ESM1. 2-HR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2019. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.6594.
- JIMENEZ, J. C. *et al.* The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 7, p. 3761-3780, 2021.
- KELLEY, M. *et al.* GISS-E2. 1: Configurations and climatology. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 8, p. e2019MS002025, 2020.
- KNUTSON, T. R.; ZENG, F. Model assessment of observed precipitation trends over land regions: detectable human influences and possible low bias in model trends. **Journal of Climate**, v. 31, n. 12, p. 4617-4637, 2018.
- KRASTING, J. P. *et al.* Noaa-gfdl gfdl-esm4 model output prepared for cmip6 cmip historical. **Earth System Grid Federation**, v. 10, 2018. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.8597>, <https://doi.org/10.22033/ESGF>.
- LI, J. *et al.* Comparative assessment and future prediction using CMIP6 and CMIP5 for annual precipitation and extreme precipitation simulation. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p. 687976, 2021.
- LI, L. *et al.* The flexible global ocean-atmosphere-land system model grid-point version 3 (FGOALS-g3): description and evaluation. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 12, n. 9, p. e2019MS002012, 2020.
- LLOPART, M. *et al.* Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climatic Change**, v. 125, p. 111-125, 2014.
- LOVATO, T.; PEANO, D. CMCC CMCC-CM2-SR5 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, 2020. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.3825.
- LUCAS, E. W. M. *et al.* Regionalization of climate change simulations for the assessment of impacts on precipitation, flow rate and electricity generation in the Xingu river basin in the Brazilian Amazon. **Energies**, v. 15, n. 20, p. 7698, 2022.
- MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.
- MASSONNET, F. *et al.* Replicability of the EC-Earth3 Earth system model under a change in computing environment. **Geoscientific Model Development**, v. 13, n. 3, p. 1165-1178, 2020.
- MASSON-DELMOTTE, V. *et al.* (ed.). **Calentamiento global de 1, 5° C: informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1, 5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza: resumen para responsables de políticas: resumen técnico: preguntas frecuentes.** 2019. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf.

MCCARTHY, N. *et al.* Droughts and floods in Malawi: impacts on crop production and the performance of sustainable land management practices under weather extremes. **Environment and Development Economics**, v. 26, n. 5-6, p. 432-449, 2021.

OLIVEIRA, D. M.de. *et al.* Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 01, p. 116-133, 2023.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; EBI, K. L.; KEMP-BENEDICT, E.; RIAHI, K., ROTHMAN, D. S.; SOLECKI, W. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

PARSONS, L. A. Implications of CMIP6 projected drying trends for 21st century Amazonian drought risk. **Earth's Future**, v. 8, n. 10, p. e2020EF001608, 2020.

PEREIRA, F. F. *et al.* A hydrological routing scheme for the Ecosystem Demography model (ED2+ R) tested in the Tapajós River basin in the Brazilian Amazon. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 9, p. 4629-4648, 2017.

PINHO, P. F.; MARENGO, J. A.; SMITH, M. S. Complex socio-ecological dynamics driven by extreme events in the Amazon. **Regional Environmental Change**, v. 15, p. 643-655, 2015.

PINTO, S. S.; SILVA, C. S. **Estatística**: volume I. Rio Grande: Ed. FURG, 2020.

RIAHI, K. *et al.* The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

RIDLEY, J. *et al.* MOHC HadGEM3-GC31-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**. Retrieved from <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/meta/CMIP6/CMIP6>. CMIP. MOHC. HadG-EM3-GC31-LL. historical, 2019.

ROCHA, F. V.da. *et al.* Política de precificação de GEE: impactos econômicos e ambientais na agrologística de grãos no Mato Grosso. **Revista de Políticas Públicas**, v. 24, n. 1, p. 137-155, 2020.

RONG, X. CAMS CAMS-CSM1. The model output prepared for CMIP6 CMIP historical (Version 20200512). **Earth System Grid Federation**, v. 9754, 2019.

ROZANTE, J. R.; MOREIRA, D. S.; GONÇALVES., L. G. G.; VILA, D. A. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation Over South America. **Weather and Forecasting**, v. 25, p. 885-894, 2010.

SANKARASUBRAMANIAN, A.; VOGEL, R. M.; LIMBRUNNER, J. F. Climate elasticity of streamflow in the United States. **Water Resources Research**, v. 37, n. 6, p. 1771-1781, 2001.

SANTOS, C.; BARROS, I.; WANZELER, R. T.; SERRÃO, E.; FARIAS, M.; LIMA, A. Regionalização hidroclimatológica da bacia hidrográfica do rio Tapajós. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 1, p. 32-51, 2015.

SANTOS, V. C.; BLANCO, C.; OLIVEIRA JÚNIOR, J. F. Distribution of rainfall probability in the Tapajos River Basin, Amazonia, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 3, 2019.

SCHEWE, J. *et al.* Multimodel assessment of water scarcity under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3245-3250, 2014.

SÉFÉRIAN, R. *et al.* Evaluation of CNRM earth system model, CNRM-ESM2-1: Role of earth system processes in present-day and future climate. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 12, p. 4182-4227, 2019.

SEMMLER, T. *et al.* AWI AWI-CM 1.1 HR model output prepared for CMIP6 HighResMIP. **Earth System Grid Federation**. Retrieved from <http://cera-www.dkrz.de/WDCC/meta/CMIP6/CMIP6.HighResMIP.AWI.AWI-CM-1-1-HR>, 2017.

SILVA, R. M. *et al.* Análise da variabilidade espaço-temporal e identificação do padrão da precipitação na bacia do rio Tapacurá, Pernambuco. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p. 357-372, 2010.

SILVEIRA, C. S. *et al.* Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, p. 317-330, 2013.

SONG, Y. *et al.* FIO-ESM v2. 0 outputs for the CMIP6 global monsoons model intercomparison project experiments. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 37, n. 10, p. 1045-1056, 2020.

SOUZA JR, C. M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

SWART, N. C. *et al.* Cccma canesm5-canoe model output prepared for CMIP6 CMIP 1pctco2. version v20190429. 2020. doi:10.22033/ESGF/CMIP6.10221.

TANG, Y. *et al.* MOHC UKESM1. 0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. **Earth System Grid Federation**, v. 10, 2019.

TANG, Y.; TANG, Q.; ZHANG, L. Derivation of interannual climate elasticity of streamflow. **Water Resources Research**, v. 56, n. 11, p. e2020WR027703, 2020.

TATEBE, H. *et al.* Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 2727-2765, 2019.

TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183-7192, 2001.

VAN LIEW, M. W. *et al.* Suitability of SWAT for the conservation effects assessment project: comparison on USDA agricultural research service watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.

VOLDOIRE, A. *et al.* Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 7, p. 2177-2213, 2019.

WATANABE, T. *et al.* Management of climatic extremes with focus on floods and droughts in agriculture. **Irrigation and Drainage**, v. 67, n. 1, p. 29-42, 2018.

WESCHENFELDER, A. B. *et al.* Geração de Curvas IDFs para Cenários Projetados na Cidade de Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, p. 201-216, 2019.

WIENERS, K. H. *et al.* MPI-M MPI-ESM1. 2-LR Model Output Prepared for CMIP6 CMIP Historical. Version 20190929. 2019.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric sciences**. [S.l.]: Academic press, 2011.

WU, T. *et al.* The Beijing Climate Center climate system model (BCC-CSM): the main progress from CMIP5 to CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1573-1600, 2019.

YUAN, X.; WOOD, E. F.; MA, Z. A review on climate-model-based seasonal hydrologic forecasting: physical understanding and system development. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 5, p. 523– 536, 2015.

YUKIMOTO, S. *et al.* The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, v. 97, n. 5, p. 931-965, 2019.

ZIEHN, T. *et al.* The Australian earth system model: ACCESS-ESM1. 5. **Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Science**, v. 70, n. 1, p. 193-214, 2020.

CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO GERAL

5.1 Resultados chaves: impactos e implicações

Esta pesquisa gerou informações sobre a questão hídrica, climática e ambiental em uma das sub-bacias mais importantes da bacia Amazônica por sua notabilidade nas questões econômica e socioambiental não somente quanto aos fatores regionais, mas para o país.

Os estudos dos usos múltiplos da água na bacia do Tapajós mostraram que várias atividades econômicas fazem uso dos recursos hídricos na bacia. Os municípios localizados na médio alto Tapajós são os que mais utilizam água. Na região do médio baixo Tapajós, o município de Santarém foi o que mais se destacou nos resultados. O uso não sustentável desse recurso, apesar de renovável, mas limitado, afeta as condições tanto de navegabilidade quanto de abastecimento para consumo humano, podendo agravar as condições sociais de vários municípios da região.

Na relação do desmatamento e clima sazonal observou-se alterações nos dados climáticos, pois apresentou anomalia negativa de precipitação na estação chuvosa e anomalia positiva de temperatura. Quanto a correlação das variáveis (desmatamento x temperatura, desmatamento x precipitação) obteve-se valores significativos nas regiões em que a floresta ainda apresenta traços mais conservados (médio baixo Tapajós). Na análise de forma geral, a bacia apresentou tendência negativa de precipitação na estação menos chuvosa e tendência positiva nas temperaturas máximas e mínimas nas duas estações estudadas. O desmatamento desordenado causa impactos diretos no clima, pois a retirada da floresta implica na diminuição da evapotranspiração importante processo do ciclo hidrológico na formação de nuvens com potencial para produzir precipitação. Outro impacto é a alteração no balanço de energia em superfície, causando alteração na temperatura do ar.

Na avaliação sobre os impactos futuros das mudanças climáticas concluiu-se que no clima futuro, haverá alterações na precipitação e nas cheias sazonais, no regime chuvoso, e estará sujeita a ocorrências de alterações nas frequências dos eventos máximos e mínimos tanto de aumento como de diminuição na precipitação e cota fluviométrica (ocasionando mais ocorrências de cheias e secas) no período mais atual quanto para próximo do final do século, estando mais propícias a tais mudanças o médio baixo Tapajós, mais especificamente a região de Itaituba. As cheias têm como impactos as perdas materiais e humanas, interrupção de

atividades econômicas e sociais nas áreas inundadas, por outro lado as secas causam perdas consideráveis na produção agrícola, problemas na navegação, aumento na ocorrência de incêndios e incidência de problemas de saúde.

5.2 Conclusão integrada

A bacia do Tapajós tem grandes contrastes em seus recursos naturais, com destaque para a questão hídrica e climática que estão sujeitas a impactos em virtude do uso e cobertura do solo de forma desordenado.

Na questão hídrica, os resultados demonstraram que esses impactos se devem ao uso do solo a partir das atividades econômicas (como a agropecuária, indústria, hidrelétricas, dentre outras), especialmente no médio alto Tapajós pelo maior quantitativo populacional, polo do agronegócio e pela maior quantidade de indústrias em sua região. No médio baixo Tapajós, os impactos ainda são menores apesar do aumento, nas últimas décadas, das atividades econômicas em direção às áreas mais conservadas da bacia.

Além dos impactos na questão hídrica, os resultados mostraram que o uso do solo também impacta o clima atual, pois o desmatamento está correlacionado com as variáveis climáticas nas áreas da bacia (alto, médio e baixo Tapajós), principalmente no médio baixo Tapajós, onde os valores foram mais significativos.

Os impactos atuais na bacia serão estendidos para o clima futuro e a bacia terá tanto intensidade de mudança de aumento como diminuição de precipitação e isso reflete na cota de cheias, principalmente na região do médio baixo Tapajós, tanto em um futuro mais próximo quanto para o final do século, em que a intensidade de mudança será maior.

Conclui-se, portanto, que a bacia do Tapajós vem sofrendo pressões pelo uso e cobertura do solo gerando impactos socioambientais nas questões hídrica e climática na atualidade e que estará exposta a consequências na precipitação e cota fluviométrica no clima futuro.

5.3 Limitações da metodologia utilizada e recomendações

Para alcançar os objetivos desta pesquisa algumas limitações foram enfrentadas. No primeiro estudo, foram utilizados dados de várias fontes, porém, muitas ou estavam desatualizadas ou não apresentavam dados suficientes, como ocorreu em alguns municípios, o que não prejudicou a pesquisa, porém poderiam ter sido repassadas informações mais atuais dos usos da água na bacia.

No segundo estudo, os resultados da relação entre o desmatamento e o clima não foram apresentados de forma geral, devido as particularidades da bacia, tais como a diversidade de comportamento de variáveis climáticas que acompanham o eixo norte-sul da bacia e a fragmentação ambiental (com várias áreas alteradas alternando com a cobertura florestal), o que poderia influenciar no resultado, assim decidiu-se por fazer a pesquisa de forma pontual utilizando algumas regiões ao longo da bacia.

A limitação do terceiro estudo, foi a baixa quantidade de estações pluviométricas e fluviométricas instaladas na bacia. Além disso, algumas dispõem de poucos dados e/ou muitas falhas. Outra limitação, são as incertezas dos modelos climáticos globais utilizados para a modelação. Apesar de estudos relatarem que o CMIP6 melhorou a representação da precipitação na América do Sul em relação aos CMIPs anteriores.

Assim, recomendam-se para futuros estudos e aplicações na bacia do Tapajós: a) Realizar estudos mais pontuais, pois a bacia do Tapajós tem particularidades devido à sua extensão, topografia, variabilidade espacial do clima, além de uma densa rede hidrográfica; b) Fazer um estudo mais detalhado, para toda a bacia, sobre a relação entre o desmatamento e as variáveis climáticas, já que nesta pesquisa foram realizados estudos utilizando apenas algumas áreas ao longo da bacia; e c) Realizar pesquisa de clima futuro utilizando modelos climáticos regionais como o RegCM, por exemplo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R.; SILVA, C. E.; RODRIGUES, M. G. Avaliação dos impactos ambientais do desflorestamento sobre o regime hídrico da região metropolitana de Petrópolis (RJ). **Engineering Sciences**, Aracaju, v. 1, n. 1, p.6-13, 31 ago. 2013.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Plano estratégico de recursos hídricos da Bacia Amazônica**: afluentes da margem direita – PERH-MDA. [S.l.], 2011
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS-ANA. **Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas**: diagnóstico. Brasília,DF, 265p, 2013.
- ALARCON, D. F.; MILLIKAN, B.; TORRES, M. **Ocekadi**: hidrelétricas, conflitos socioambientais e resistência na Bacia do Tapajós. Brasília, DF: International Rivers Brasil, 2016. ARTAXO, P. A Amazônia e as mudanças globais. **Ciência Hoje**, v. 38, n. 224, p. 20, 2016.
- BAYER, D. M.; COLLISCHONN, W. Análise de sensibilidade do Modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra. **RBRH–Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 165-179, 2013.
- BEST, A.; ZHANG, L.; MCMAHOM, T.; WESTERN, A.; VERTESSY, R. **A critical review of paired catchment studies with reference to seasonal flow and climatic variability**. Australia: CSIRO Land and Water Technical, MDBC Publication 2003, 56 p.
- BOSCH J. M.; HEWLETT J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v. 55, p. 3-23. 1982.
- BIERI, M. L.; PICANÇO, V. M. P. A. Considerations of mining in Tapajos basin and impacts on Munduruku land. **International Journal of Development Research**. v. 9, p. 28622-28631, 2019.
- BRITO, R.; CASTRO, E. Desenvolvimento e conflitos na Amazônia: um olhar sobre a colonialidade dos processos em curso na BR- 163/Development and Conflict in the Amazon-a glimpse into the coloniality of on-going processes in BR-163. **Revista Nera**, n. 42, p. 51-73, 2018.
- CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA- CEPEL. **Caracterização das questões socioambientais relacionadas ao desenvolvimento de usinas hidrelétricas sob o conceito de usinas plataforma**. [S.l.: s.n], 2014. (Relatório Técnico – 7953/2016).
- CHENG J. D.; LIN L. L.; LU H. S. Influence of forests on water flows from headwater watersheds in Taiwan. **Forest Ecology and Management**, v. 165, p. 11-28, 2002.
- COHEN, J. C. P.; BELTRÃO, J. C.; GANDU, A. W.; SILVA, R. R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 36-39, 2007.

CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O.; CÂNDIDO, L. A.; SANTOS, R. M. N. D.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007

COSTA, F. de A. **Elementos para uma economia política da Amazônia**: historicidade, territorialidade, diversidade, sustentabilidade. Belém: Naea, 2012. 468p.

COSTA, M. H.; BOTTA, A.; CARDILLE, J. A. Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. **J. Hydrol.**, v. 283, p. 206-217, 2003.

FEARNSIDE, P. M. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: the environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon. **Environmental Management**, v. 39, n. 5, p. 601, 2007.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. A seca e o desmatamento. **Ciência Hoje**, v. 54, n. 322, p. 52. 2015

FEARNSIDE, P. M. **A floresta amazônica nas mudanças globais**. Manaus: INPA, 2003, 134 p.

FEARNSIDE, P. M. Serviços ambientais como estratégia para o desenvolvimento sustentável na Amazônia rural. In: CAVALCANTI, C. (ed.) **Meio ambiente, desenvolvimento sustentável e políticas públicas**. São Paulo: Editora Cortez, 1997. p. 314-344.

FERREIRA, M. D. P.; COELHO, A. B. Desmatamento Recente nos Estados da Amazônia Legal: uma análise da contribuição dos preços agrícolas e das políticas governamentais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 53, n. 1, p. 91-108, 2015.

HEREDIA, B.; PALMEIRA, M.; LEITE, S., P. Sociedade e economia do "agronegócio" no Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Sociais**, v. 25, n. 74, p. 159-176, 2010.

LAPOLA, D. M. et al. The drivers and impacts of Amazon forest degradation. **Science**, v. 379, n. 6630, p. eabp8622, 2023.

LOUREIRO, R. S.de; SARAIVA, J. M.; SARAIVA, I.; SENNA, R. C.; FREDÓ, A. S. Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 83-94, 2014.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília,DF: Ministério do Meio Ambiente Secretaria de Biodiversidade, 2007, 212 p.

NASCIMENTO, C. P.; SILVA, M.; FERREIRA, M. B. P. A pecuária como atividade primaz na Amazônia: uma discussão acerca dos seus aspectos ambientais, das populações humanas envolvidas e do papel das instituições na dinâmica desta atividade. **Revista de Estudos Sociais**, Cuiabá, n 33, v. 17, 2015.

NEVES, P. B. T.das. *et al.* Amazon rainforest deforestation influenced by clandestine and regular roadway network. **Land Use Policy**, v. 108, p. 105510, 2021.

NÓBREGA, R. S. Impactos do desmatamento e de mudanças climáticas nos recursos hídricos na Amazônia ocidental utilizando o modelo SLURP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. SPE, p. 111-120, 2014.

OLIVEIRA, L. L.de. *et al.* Hydric ecosystem services in a non-disturbed rainforest of the Amazon, Amapá, Brazil. **Nature and Conservation**, v. 13, n. 4, p. 45-54, 2020.

OLIVEIRA NETO, T. As rodovias na Amazônia: uma discussão geopolítica. *Confins*. **Revue Franco-Brésilienne de Géographie/Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 501, 2019.

PARSONS, L. A. Implications of CMIP6 projected drying trends for 21st century Amazonian drought risk. **Earth's Future**, v. 8, n. 10, p. e2020EF001608, 2020.

PIMENTEL, N. R. M. A ocupação da Amazônia e o desencantamento do seu espaço natural. **Revista Eletrônica Veredas Amazônicas**, v. 3, n. 1, p. 42-54, 2014.

RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. **Fragmentação de ecossistemas**: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Brasília: MMA/Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2005, 510p.

REIS, C. T. M. D. dos; RIBEIRO, O. de S. Amazônia: responsabilidade sobre o mundo. **Revista Eletrônica Mutações**, v. 5, n. 9, p. 045-061, 2014.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F. W. S.; SILVA, P. R. T. D.; GOMES, W. B.; VERGASTA, L. A.; MOURA, R. G. D.; SILVA, J. J. S. D. Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 387-398, 2017.

ROCHA, L. R. L.; FAGG, C. W. **A Área de Influência da BR-163 no Estado do Mato Grosso**: desmatamento e sua relação com a saúde ambiental no Município de Peixoto de Azevedo. Researchgate, Brasília, DF, jan. 2015.

RODRIGUES-FILHO, S.; BERÇÇOT, M. A.; TANIMOTO, A.; LITRE, G. Aspectos geopolíticos das mudanças climáticas: a sustentabilidade do Brasil numa economia global de baixo carbono. **Revista Plenarium**, Ano 4, n. 5, p. 84-94, 2008.

RUPRECHT J. K.; SCHOFIELD N. J. Analysis of streamflow generation following deforestation in Southwest Western Australia. **Journal of Hydrology**, v. 105, n. ½, p. 1-17, 1989.

SANTOS, E. S.dos. *et al.* The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. **Science of the Total Environment**, v. 624, p. 887-899, 2018.

SILVA DIAS, M. A. F.; COHEN, J. C. P.; GANDÚ, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 2, p. 215-222, 2005.

SMITH, C.; BAKER, J. C. A.; SPRACKLEN, D. V. Tropical deforestation causes large reductions in observed precipitation. **Nature**, v. 615, n. 7951, p. 270-275, 2023.

SOUZA, E. B.de; CARMO, A. M. C.; MORAES, B. C.; NACIF, A.; FERREIRA, D. B. S.; ROCHA, E. J. P.; SOUZA, P. J. O. P. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo regcm4 (seasonal precipitation over the brazilian legal Amazon: climate current and future projections using regcm4 model). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, p. 293-306, 2016.

SOUZA FILHO, P. W. M. *et al.* Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 167, p. 175-184, 2016.

SOUZA JUNIOR, R. C.; MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas: impactos e cenários para a Amazônia**. São Paulo: Instituto Socioambiental, Instituto de Energia e Ambiente, Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, Universidade de São Paulo; Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) para Mudanças Climáticas Fase 2, 2018. 33p.

THÉRY, H. A. expansão da produção de grãos e a infraestrutura de circulação no Brasil. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 2019, n. 3, p. 284-305, 2019.

TRANCOSO, R.; CARNEIRO FILHO, A.; TOMASELLA, J. Amazônia, desflorestamento e água: A interação entre a floresta tropical e a maior bacia hidrográfica do planeta. **Ciência Hoje**, v. 40, n. 239, p. 30-7, 2007.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135-152, 1997.

VERDUM, R.; GAMBOA, C.; BEBBINGTON, A. J. **Assessment and scoping of extractive industries and infrastructure in relation to deforestation: Amazonia**. Peru: Institute for the Sciences of Nature, Territory and Renewable Energies of the Pontifical Catholic University of Peru (INTE-PUCP), 2019, 81p.