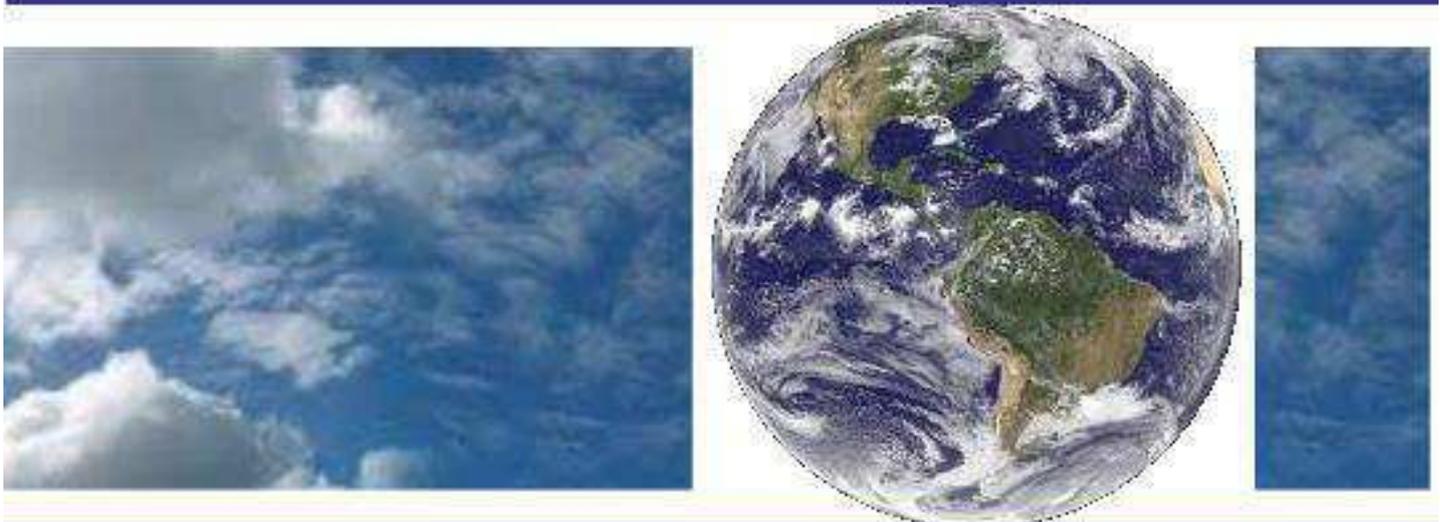


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

METEOROLOGIA



TESE DE DOUTORADO

Edmundo Wallace Monteiro Lucas

**Regionalização dos impactos das mudanças
climáticas nos regimes de chuva e vazão na Bacia
Hidrográfica do Xingu**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS

**REGIONALIZAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS
REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU**

Campina Grande - PB
Fevereiro de 2022

EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS

**REGIONALIZAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS
REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU**

Trabalho de Tese (Doutorado) apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Doutor em Meteorologia.

Área de concentração: Meteorologia de Meso e Grande Escalas

Subárea: Climatologia

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva

Campina Grande - PB

Fevereiro de 2022

L933s

Lucas, Edmundo Wallace Monteiro.

Regionalização dos impactos das mudanças climáticas nos regimes de chuva e vazão na bacia hidrográfica do Xingu / Edmundo Wallace Monteiro Lucas. – Campina Grande, 2022.

153 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva".

Referências.

1. Climatologia. 2. Cenários Climáticos. 3. Mudanças Climáticas. 4. Precipitação. 5. Energia Elétrica. 6. Vazão. I. Sousa, Francisco de Assis Salviano de. II. Silva, Fabrício Daniel dos Santos. III. Título.

CDU 551.58(043)

EDMUNDO WALLACE MONTEIRO LUCAS

REGIONALIZAÇÃO DOS IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS
REGIMES DE CHUVA E VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO XINGU

TESE APROVADA EM 23/02/2022

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. FRANCISCO DE ASSIS SALVIANNO DE SOUSA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. FABRÍCIO DANIEL DOS SANTOS SILVA
Instituto de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Alagoas


Prof. Dr. JOSÉ IVALDO BARBOSA DE BRITO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. EVERALDO BARREIROS DE SOUZA
Instituto de Geociências
Universidade Federal do Pará


Dr. MOZAR DE ARAÚJO SALVADOR
Instituto Nacional de Meteorologia

Dedico este trabalho aos meus pais, João Batista Lucas “*in memoriam*” e Eliana Silva Monteiro por tudo que me ensinaram e proporcionaram na vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, sabedoria e seu infinito amor.

Ao orientador, Prof. Dr. Francisco de Assis Salviano de Sousa, pela orientação, liberdade e confiança depositada que possibilitou a conclusão desse trabalho.

Ao coorientador, Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva, pelo incentivo e suporte importante em várias etapas do desenvolvimento do trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, em nome do coordenador Prof. Dr. Carlos dos Santos, em especial a secretaria pela atenção e assistência prestada durante o curso.

Aos membros da banca examinadora (qualificação e defesa), que contribuíram com suas críticas e sugestões para as melhorias realizadas no trabalho.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo fornecimento de dados e liberação para cursar as disciplinas do doutorado em Campina Grande/PB.

A Agência Nacional de Águas (ANA), pelo fornecimento de dados.

Aos meus familiares em especial aos meus irmãos, Kellen Sobrinho, Hellen Lucas, Wellington Lucas, Karen Regina e sobrinhos queridos, pela amizade e apoio que sempre me deram nesta jornada científica.

A Lorena Soares (sobrinha), pela amizade e cumplicidade, apesar da distância sempre dividimos questões importantes.

Aos amigos que me deram suporte durante minha estadia na Paraíba, em especial a Adeilda Sousa, Leydison Galvincto e Pamela Lorena.

A equipe de trabalho, em especial a Marcia Seabra e Maria Cristina que dividiram comigo as responsabilidades do INMET, durante este período do doutorado.

A todos os colegas da meteorologia, que tanto torceram por mim em especial aos amigos Alan Braga, Antônio José, Danielle Ferreira e Kleber Ataíde pelo incentivo e amizade.

Agradeço de forma simples a todos meus colegas e amigos que em algum momento (lazer, aulas ou produção científica) fizeram parte destes anos acadêmicos.

“Só você determina suas limitações, por isso não desista mesmo que tudo pareça perdido, tenha coragem”

Autor desconhecido.

RESUMO

Os impactos das mudanças climáticas devem influenciar na intensificação de eventos extremos nas próximas décadas como enchentes e secas. Diante disso, este trabalho teve como objetivo gerar cenários futuros regionalizados de mudanças climáticas para precipitação na Bacia Hidrográfica do Xingu (BHX), no horizonte 2021-2080 e avaliar seus impactos nas vazões mensais e possíveis consequências na produção de energia na hidrelétrica de Belo Monte. Um downscaling estatístico foi empregado para obter as séries futuras de precipitação na BHX e destas derivar a vazão por meio da técnica de Regressão por Componentes Principais, devidamente calibrada e validada para a estação de Altamira, referência para Belo Monte. Foi utilizado o ensemble de quatro Modelos Climáticos Globais (CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR e NORESM1-M) e dois cenários climáticos (RCP 4.5 e RCP 8.5). Ainda foram avaliados tendências e índices de extremos de precipitação na BHX no período de 1980 a 2016. A maior parte dos índices apresentou tendência positiva na parte norte e negativa na parte sul da BHX. Grandes porções da BHX apresentaram essas tendências com significância estatística, com resultados homogêneos em muitos deles, principalmente os índices R95p, R20, SDII e PRECTOT. As projeções futuras para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 foram unânimes em apontar redução das chuvas no período chuvoso e aumento discreto no período seco na BHX em comparação com o período de referência (1981-2010). Consequentemente, as projeções apontaram reduções nas vazões em Altamira e redução no potencial de geração de energia em Belo Monte nos dois períodos analisados (2021-2050 e 2051-2080). O cenário RCP 4.5 apresentou as maiores reduções das chuvas e vazões nos dois períodos em comparação ao cenário RCP 8.5. Diante deste panorama, até 2080 espera-se uma redução anual no potencial de geração de energia em Belo Monte de 21,3% em comparação ao período de referência e aproveitamento de 38,8% do potencial máximo instalado. A crescente demanda de consumo de água para atender aos usos múltiplos da bacia, associado às mudanças climáticas devem influenciar a disponibilidade de água para geração de energia em Belo Monte. Essas informações podem auxiliar os tomadores de decisões em adotar políticas energéticas e medidas de mitigação aos possíveis impactos destes cenários e reforçam a necessidade de investimentos em outras fontes de energias renováveis para compensar as perdas de produção hidrelétrica de Belo Monte no futuro.

Palavras-Chave: Cenários Climáticos, Precipitação, Vazão, Energia Elétrica.

ABSTRACT

The impacts of climate change should influence the intensification of extreme events in the coming decades, such as floods and droughts. Therefore, this work aims to generate regionalized future scenarios of climate change for rainfall in the Xingu River Basin (XRB), in the 2021-2080 horizon and to evaluate its impacts on monthly streamflow and possible consequences on energy production at the Belo Monte hydroelectric plant. A statistical downscaling to obtain the future series of rainfall in the XRB was used and from these derive the streamflow using the Principal Component Regression technique, duly calibrated and validated for the Altamira station, a reference for Belo Monte. The ensemble of four Global Climate Models (CanESM2, CNRM-CM5, MPI-ESM-LR and NORESM1-M) and two climate scenarios (RCP 4.5 and RCP 8.5) were used. Trends and rainfall extremes indices in the XRB in the period from 1980 to 2016 were also evaluated. Most of the indices showed a positive trend in the northern part and a negative trend in the southern part of the BHX. Large portions of XRB showed these trends with statistical significance, with homogeneous results in many of them, especially the R95p, R20, SDII and PRECTOT indices. Future projections for RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios were unanimous in pointing out a significant reduction in rainfall in the rainy season and a slight increase in the dry season in XRB compared to the reference period (1981-2010). Consequently, the projections also pointed to reductions in streamflow in Altamira and reduction in the energy generation potential in Belo Monte in the two periods analyzed (2021-2050 and 2051-2080). The RCP 4.5 scenario presented the largest reductions in rainfall and streamflow rates in the two periods compared to the RCP 8.5 scenario. In light of this scenario, by 2080, an annual reduction in the energy generation potential in Belo Monte of 21.3% is expected compared to the reference period and the utilization of 38.8% of the maximum installed potential. The increasing demand for water consumption to meet the multiple uses of the basin, associated with climate change, should influence the availability of water for energy generation in Belo Monte. This information can help decision makers to adopt energy policies and mitigation measures to the possible impacts of these scenarios and reinforce the need for investments in other sources of renewable energy to compensate for the losses of hydroelectric production in Belo Monte in the future.

Keywords: Climate Scenarios, Rainfall, Streamflow, Electric Power.

SUMÁRIO

	Pg.
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 JUSTIFICATIVA.....	2
1.2 OBJETIVOS.....	4
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	4
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 TENDÊNCIAS E EXTREMOS CLIMÁTICOS.....	5
2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	7
2.3 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	9
2.4 DOWNSCALING ESTATÍSTICO.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	16
3.1 ÁREA DE ESTUDO.....	16
3.1.1 COMPLEXO HIDRÉLETRICO DE BELO MONTE.....	19
3.2 DADOS UTILIZADOS.....	21
3.3 TESTE DE MANN-KENDALL.....	22
3.4 TESTE DE PETTITT.....	23
3.5 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS.....	24
3.6 REGRESSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS.....	25
3.7 FERRAMENTA DE PREVISIBILIDADE.....	27
3.8 AVALIADORES DE DESEMPENHO.....	28
3.9 CENARIOS CLIMÁTICOS E MCG's UTILIZADOS.....	30
3.10 ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRELETRICO.....	34

4. RESULTADOS.....	36
4.1 CLIMATOLOGIA E TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NA BHX.....	36
4.1.1 CLIMATOLOGIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL.....	36
4.1.2 TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO PLUVIAL.....	41
4.2 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS.....	48
4.3 SIMULAÇÕES DAS VAZÕES MENSAS.....	53
4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DOWSCALING ESTATÍSTICO.....	61
4.5 COMPARAÇÃO DOS CENARIOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO.....	64
4.6 CENARIOS CLIMÁTICOS FUTUROS.....	66
4.6.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIAL.....	66
4.6.2 VAZÃO.....	73
4.6.3 POTENCIAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA.....	78
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
6. REFERÊNCIAS.....	87
ANEXOS.....	106
APÊNDICES.....	112

LISTA DE FIGURAS

	Pg.
Figura 1 - Forçamento radiativo (A) e emissões de CO ₂ (B) dos RCP's	10
Figura 2 - Forçamento radiativo (A) e emissões do CO ₂ (B) nos RCP's e SSP's	11
Figura 3 - Resumo dos principais impactos das mudanças climáticas observados nos sistemas humanos em todo o mundo	13
Figura 4 - Localização da BHX, Altamira e Belo Monte (esquerda), estações fluviométricas e altimetria da BHX (direita)	16
Figura 5 - Composição espacial das imagens do uso e cobertura do solo na BHX para o período de 1985 -2015 (MapBiomias, 2019)	17
Figura 6 - Arranjo geral do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte na BHX	19
Figura 7 - Imagem da grade sobre a região Amazônia utilizada para estabelecer relações preditor (reanálises) e preditando (observações de superfície)	32
Figura 8 - Esquema do processo de downscaling estatístico utilizado no trabalho	33
Figura 9 - Climatologia mensal da precipitação pluvial na BHX para período de 1981- 2010	37
Figura 10 - Climatologia anual da precipitação pluvial no período de 1981-2010 (A), precipitação anual em anos com evento de El Niño (B), e a precipitação anual em anos com evento de La Niña (C) na BHX	39
Figura 11 - Desvio de precipitação pluvial anual nos anos com evento de El Niño (A), e em anos com evento de La Niña (B) na BHX	40
Figura 12 - Pontos de dados “ <i>grids</i> ” de precipitação pluvial na BHX nas regiões do Baixo, Médio e Alto Xingu, utilizados no trabalho	41
Figura 13 - Boxplots dos valores mensais da precipitação pluvial nas três regiões da BHX no período de 1980-2016	42

Figura 14 - Totais anuais de precipitação pluvial e linhas de tendências, nas regiões do Baixo Xingu (A) Médio Xingu (B), Alto Xingu (C), para o período de 1980 a 2016	44
Figura 15 - Distribuição espacial das tendências dos índices de extremos climáticos de precipitação na BHX de 1980 a 2016: RX1day (a), RX5day (b), R1mm (c), R10mm (d), R20mm (e), SDII (f), CDD (g), CWD (h), R95p (i), R99p (j), PRECTOT (k). Os pontos de grades usados na BHX para elaboração dos índices de precipitação são mostrados no ultimo mapa (l). *Intervalo de Confiança usado 95%	52
Figura 16 - Precipitação pluvial mensal observada e vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira, período de 2011-2014 (validação)	58
Figura 17 - Dispersão entre as vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira no período de 2011-2014 (validação)	59
Figura 18 - Climatologia mensal da precipitação pluvial e vazão na estação de Altamira no período de 1981-2010	60
Figura 19 - Climatologia da precipitação pluvial mensal em Altamira no período de 1979-2010 (valores observados, simulados pelos modelos e ensemble)	61
Figura 20 - Dispersão entre as precipitações pluviiais mensais simuladas e observadas na estação de Altamira no período de 1979-2010	62
Figura 21 - Diferença na climatologia de precipitação pluvial mensal (ensemble dos modelos - observado) no período de 1979-2010 na BHX	63
Figura 22 - Média mensal de precipitação pluvial projetada com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e média mensal observada na estação de Altamira no período de 2011-2020 ...	64
Figura 23 - Dispersão entre as precipitações pluviiais mensais simuladas com os cenários RCP 4.5 (A) e RCP 8.5 (B) e observadas na estação de Altamira no período de 2011-2020	65
Figura 24 - Desvio sazonal de precipitação pluvial na BHX no período 2021-2050, cenário RCP 4.5 (superior) e cenário RCP 8.5 (inferior)	66
Figura 25 - Desvio anual de precipitação na BHX no período 2021-2050, cenário RCP 4.5 (A) e cenário RCP 8.5 (B)	67

Figura 26 - Desvio sazonal de precipitação pluvial na BHX no período 2051-2080, cenário RCP 4.5 (superior) e cenário RCP 8.5 (inferior)	68
Figura 27 - Desvio anual de precipitação pluvial na BHX no período 2051-2080, cenário RCP 4.5 (A) e cenário RCP 8.5 (B)	69
Figura 28 - Precipitação pluvial média mensal no período 2021-2050 (A), período 2051-2080 (B) e a climatologia da precipitação pluvial observada em Altamira.....	70
Figura 29 - Vazão média mensal no período 2021-2050 (A), período 2021 a 2050 (B) e a climatologia da vazão mensal observada em Altamira	73
Figura 30 - Curva de Permanência das vazões médias mensais em Altamira, período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B)	75
Figura 31 - Estimativa do potencial médio de energia mensal disponível para Belo Monte, período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B)	78
Figura 32 - Variações nas projeções de chuva e vazão na BHX em Altamira e da geração de energia em Belo Monte, RCP 4.5 (A) e RCP 8.5 (B)	81

LISTA DE TABELAS

	Pg.
Tabela 1. Características do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte (EPE, 2010).	20
Tabela 2. Hidrograma Ecológico de Belo Monte (EPE, 2010)	20
Tabela 3. Índices extremos climáticos de precipitação utilizados	24
Tabela 4. Características dos RCP's utilizados (Adaptado: MOSS <i>et al.</i> , 2010)	30
Tabela 5. Características dos MCG's utilizados (Adaptado: ZEBASE <i>et al.</i> , 2019)	31
Tabela 6. Dados oficiais do projeto da usina de Belo Monte (EPE, 2010)	35
Tabela 7. Estatística descritiva da precipitação pluvial anual nas três regiões da BHX....	43
Tabela 8. Características e resultados dos testes de Mann-Kendall nas três regiões da BHX	45
Tabela 9. Características e resultados do teste de Pettitt nas três regiões da BHX	46
Tabela 10. Índices climáticos de precipitação e número de pontos de grade com tendências não significativos (NS) e significativos (S) ao nível de 5% na BHX, bem como a porcentagem dos valores significativos (S)	48
Tabela 11. Coeficientes de correlação entre as vazões simuladas e observadas no período de treinamento nas estações da BHX	54
Tabela 12. Coeficientes de correlação mensais entre as vazões simuladas e observadas nas estações fluviométricas na BHX, no período de treinamento/calibração	55
Tabela 13. Informações descritivas das series de vazões mensais para o período de 1981 a 2010 nas estações fluviométricas da BHX	56
Tabela 14. Métricas estatísticas entre as vazões mensais simuladas e observadas no período de validação nas estações fluviométricas da BHX	57
Tabela 15. Variação da precipitação pluvial projetada em Altamira em comparação ao período observado de 1981-2010	71
Tabela 16. Variação da vazão projetada em Altamira em comparação ao período observado de 1981-2010	76

Tabela 17. Potencial da geração de energia projetada em Belo Monte em referência a potência máxima instalada.....	79
Tabela 18. Variação do potencial da geração de energia projetada em Belo Monte em comparação ao período de 1981 a 2010.....	80
Tabela A1. Dados Energéticos do CHBM (EPE, 2010)	106
Tabela A2. Informações referentes as estações fluviométricas disponíveis na BHX.....	107
Tabela A3. Informações referentes as estações meteorológicas do INMET, utilizadas no DE na Amazônia)	108

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AR	Report Assessment
AX	Alto Xingu
BHX	Bacia Hidrográfica do Xingu
BX	Baixo Xingu
CDD	Consecutive Dry Days
CHBM	Complexo Hidrelétrico de Belo Monte
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project Phase
CPT	Climate Predictability Tool
CPTEC	Centro de Previsão do tempo e Estudos Climáticos
CN	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
CWD	Consecutive Wet Days
DE	Downscaling Estatístico
DJF	Dezembro-Janeiro-Fevereiro
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EPE	Empresa Pesquisa Energética
ETCCDI	Expert Team on Climate Change Detection and Indices
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverse Distance Weighted
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JJA	Junho-Julho-Agosto
MAM	Março-Abril-Maio
MCG	Modelo Climático Global
MX	Médio Xingu
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PRCPTOT	Precipitação total anual nos dias chuvosos

PCR	Principal Components Regression
RCP	Representative Concentration Pathway
REQM	Raiz do Erro Quadrático Médio
Rx1day	Quantidade máxima de precipitação em um dia
Rx5day	Quantidade máxima de precipitação em cinco dias
R1mm	Número de dias em um ano quando precipitação $\geq 1\text{mm}$
R10mm	Número de dias em um ano quando precipitação $\geq 10\text{mm}$
R20mm	Número de dias em um ano quando precipitação $\geq 20\text{mm}$
R95p	Dias úmidos quando precipitação $>$ percentil 95
R99p	Dias extremamente úmidos quando precipitação $>$ percentil 99
SDII	Índice simples de intensidade diária de precipitação
SDM	Statistical Downscaling Model
SON	Setembro-Outubro-Novembro
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
SSP	Shared Socio-Economic Patwhay
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TVR	Trecho de Vazão Reduzida
ZCAS	Zona de convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Xingu (BHX) está localizada no território da Amazônia legal e abriga hoje um dos maiores projetos do governo brasileiro em termos de produção de energia, o Complexo Hidrelétrico de Belo Monte (CHBM), considerada a quarta maior usina hidrelétrica do mundo em capacidade de geração instalada sendo o maior empreendimento energético 100% brasileiro. O CHBM concluído em 2019, tem capacidade potencial instalado de produzir 11.233 MW, isto representa quase 10% da demanda brasileira de energia elétrica (STICKLER *et al.*, 2013; DE MENEZES, 2017; NORTE ENERGIA, 2018).

A BHX tem uma área de aproximadamente 510.000 km², abrange dois importantes biomas brasileiros (Amazônia e Cerrado). Nela encontra-se cerca de 280.000 km² de áreas de preservação ambiental e terras indígenas importantes como o Parque Indígena do Xingu (PIX), uma das maiores áreas de conservação da floresta no Brasil com aproximadamente 26.000 Km² que representa apenas 5% da área da BHX, contudo, abriga várias etnias de povos indígenas além da fauna e flora exuberante. Este território está constantemente ameaçado por ações antrópicas como o desmatamento para expansão da fronteira agrícola e pecuária principalmente em toda a área adjacente ao PIX (VILLAS-BOAS, 2012; SCHWARTZMAN *et al.*, 2013, DE OLIVEIRA *et al.*, 2020).

No contexto de geração de energia, o Brasil é considerado um dos países com a matriz energética mais renovável do mundo, atualmente 64,1% da capacidade de geração de energia no país está ligado as usinas hidrelétricas, 22,9% termoelétricas, 9% eólica e 4% fontes como energia solar, nuclear e outras (EPE, 2020). As variações climáticas influenciam no volume de água disponível nos reservatórios para geração de energia elétrica, então o estabelecimento de regras para operações das usinas hidrelétricas deve considerar a disponibilidade dos recursos hídricos com base em cenários futuros confiáveis (DIAS *et al.*, 2018).

Estudos sobre planejamento operacional, gestão e investimentos em geração de energia em usinas hidrelétricas no Brasil e em especial na bacia Amazônica vem sendo realizados com frequência (MENDES *et al.*, 2017; DE QUEIROZ *et al.*, 2019). Trabalhos sobre projeções climáticas baseados em cenários apontam um futuro com queda nas tendências de chuvas na Amazônia (CHOU *et al.*, 2014; MARTINS *et al.*, 2015), essas projeções tornam os sistemas hidrelétricos sensíveis, pois variações nas precipitações estão diretamente correlacionadas com

as vazões observadas e conseqüentemente impactam a geração de energia hidrelétrica nos reservatórios da Amazônia.

Para determinar a influência antrópica no clima atual, um enorme número de observações experimentais de vários parâmetros ambientais foi compilado pela equipe do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), que investigou as alterações climáticas em curso no planeta. Variações na temperatura média do ar, nos padrões de precipitação, na área coberta por neve, no nível do mar e muitos outros parâmetros ambientais foram analisadas detalhadamente. As conclusões indicam que, dentro de um índice de confiabilidade de 95%, o clima de nosso planeta está efetivamente sendo alterado (IPCC, 2014 e IPCC, 2021).

Na hidrologia os modelos utilizados buscam representar o comportamento do ciclo hidrológico na bacia hidrográfica, este comportamento é determinado por algumas características físicas, geológicas e climáticas. A influência das variações e mudanças climáticas nas componentes do ciclo hidrológico vem sendo estudada por meio de cenários futuros, principalmente em bacias com grandes demandas de água e empreendimentos energéticos. Nesse contexto, esta pesquisa pretende usar cenários futuros de mudanças climáticas para avaliar o comportamento da precipitação pluviométrica e conseqüentemente da vazão hidrológica na BHX, buscando detectar possíveis impactos no futuro na geração de energia da hidrelétrica de Belo Monte.

1.1 JUSTIFICATIVA

A grande área da BHX é carente em dados históricos de variáveis hidrometeorológicas. Uma das importantes contribuições desta pesquisa foi efetuar um levantamento das informações atualizadas e coletadas por importantes instituições brasileiras, como Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agencia Nacional de Águas (ANA), além de análises recentes de dados meteorológicos organizados em “*grids*” estimados por pesquisadores de instituições internacionais, promovendo a construção de um banco de dados mais confiável possível dessas informações para a BHX em um período de 30 anos. Esses dados são de fundamental importância para a elaboração e validação dos resultados pretendidos neste trabalho, além de servir para pesquisas e aplicações futuras com enfoque na BHX.

A aplicação de modelagem hidrológica chuva-vazão por meio de técnicas estatísticas (modelos empíricos) vem crescendo nas últimas décadas, principalmente pela indisponibilidade

de alguns dados de entrada dos modelos conceituais, a necessidade de previsões menos complexas, mais rápidas e confiáveis. Neste sentido, foi utilizada a técnica de regressão por componentes principais para a modelagem empírica chuva-vazão na BHX, buscando apresentar uma ferramenta menos complexa e operacional nas simulações das vazões médias mensais para o uso em diversas aplicações na bacia. As bacias hidrográficas localizadas na Amazônia são particularmente adequadas para a aplicação de modelos hidrológicos chuva-vazão pois a precipitação e a vazão são altamente correlacionadas nestas bacias.

No âmbito das mudanças climáticas, a maior parte das projeções futuras provém de Modelos Climáticos Globais, cuja resolução espacial é baixa, com poucos pontos de grade cobrindo grandes regiões ou bacias. Nesta pesquisa, a construção de uma base observacional consistente permitirá a regionalização de projeções de mudanças climáticas baseados em cenários futuros no horizonte 2021-2080 a nível dos pontos de observações da BHX, permitindo respostas mais precisas e eficazes para as variáveis chuva e vazão. Os resultados esperados poderão auxiliar na melhoria do planejamento e operação do reservatório de Belo Monte, visando a geração de energia hidroelétrica.

Além do potencial comprovado para geração de energia hidrelétrica, a BHX também tem extrema importância ambiental e cultural por conter além da floresta amazônica, porções consideráveis do cerrado, unidades de conservação florestal e de povos indígenas. Os resultados desta pesquisa poderão contribuir significativamente para uma melhor compreensão de importantes fenômenos ambientais que afetam a BHX, como a periodicidade do regime de secas e riscos de incêndios florestais, que trazem prejuízos ambientais as populações locais.

A pesquisa foi desenvolvida no intuito de responder as seguintes questões:

- i. Há tendências e mudanças estatisticamente significantes nos padrões e nos índices de extremos climáticos de precipitação nas três regiões da BHX?
- ii. Com base em diferentes cenários de mudanças climática, quais as projeções para o regime hidrológico (chuva e vazão) da BHX?
- iii. Quais os possíveis impactos esperados no potencial da geração de energia na hidrelétrica de Belo Monte?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar cenários futuros regionalizados de mudanças climáticas para precipitação pluvial na BHX, no horizonte 2021-2080 e verificar os impactos destes cenários nas vazões mensais e possíveis consequências na produção de energia na usina hidrelétrica de Belo Monte.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar a climatologia mensal e anual da precipitação pluvial na BHX no período de 1981-2010, período representativo a uma Normal Climatológica de referência, conforme orientações da Organização Meteorológica Mundial (OMM);
- Identificar tendências de precipitação pluvial em escala sazonal e anual nas últimas décadas nas três regiões da bacia (Alto, Médio e Baixo Xingu), no intuito de observar padrões e/ou discontinuidades nos regimes de chuva na BHX;
- Analisar índices de extremos climáticos de precipitação na BHX e identificar tendências anuais observadas no período de 1980 a 2016, para apoiar as projeções futuras de chuva e vazão na bacia;
- Aplicar uma modelagem empírica chuva-vazão e apresentar a metodologia como uma ferramenta útil e operacional nas simulações de vazões mensais para subsidiar a tomada de decisões no planejamento dos usos múltiplos dos recursos hídricos na BHX.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TENDÊNCIAS E EXTREMOS CLIMÁTICOS

Nas últimas décadas, eventos meteorológicos extremos como secas e inundações vem ocorrendo com maior frequência em todo o mundo (IPCC, 2021). Diante disto, vários trabalhos foram desenvolvidos em diferentes regiões do mundo (Canadá, China, Estados Unidos, Austrália, Europa, Geórgia, Romênia e México) avaliando tendências, alterações nos padrões e eventos extremos de variáveis meteorológicas como precipitação e temperatura do ar, buscando identificar indícios de variabilidade e/ou alterações climáticas regionais e global (GEMMER *et al.*, 2011; BOTH *et al.*, 2011; GALLANT *et al.*, 2014; KEGGENHOFF, *et al.*, 2014; CROITORU, *et al.*, 2016; BAEZ-GONZALEZA *et al.*, 2018).

Desde a década de 1990, muitos seminários internacionais foram realizados no intuito de desenvolver um sistema de referência mundial uniforme de índices climáticos de precipitação e temperatura para facilitar a avaliação das mudanças nos padrões globais, intensidades e extremos. Os trabalhos pioneiros sobre tendências de extremos climáticos nas variáveis meteorológicas foram desenvolvidos por FOLLAND *et al.*, (1999) e NICHOLLS e MURRAY, (1999). O objetivo era criar uma quantidade mínima de índices de extremos climáticos que poderiam ser calculados para uma variedade de climas, possibilitando comparação entre diferentes regiões. Os índices deveriam ser fáceis de interpretar, relevantes para as preocupações práticas dos formuladores de políticas no setor público e fornecer contribuições potenciais para o IPCC.

HAYLOCK *et al.*, (2006) avaliaram padrões e extremos de precipitação na América do Sul entre 1960 a 2000 e conexões com a temperatura da superfície do mar, os autores mostraram que índices de extremos climáticos é uma metodologia consistente para avaliar resultados de mudanças e tendências climáticas. Vários trabalhos também utilizaram índices de extremos climáticos em outras partes do mundo incluindo a América do Sul e Brasil (SATIAMURTY *et al.*, 2010; DOS SANTOS *et al.*, 2012; SKANSI *et al.*, 2013; CHANG *et al.*, 2014; DOS SANTOS e OLIVEIRA, 2017; SALVADOR e BRITO, 2017; DA SILVA *et al.*, 2018a; DA SILVA *et al.*, 2019; COSTA *et al.*, 2020; DOS REIS, *et al.*, 2020).

Para Amazônia, muitos estudos foram realizados buscando avaliar eventos extremos e tendências de variáveis meteorológicas nas últimas décadas (MARENGO e ESPINOZA, 2016; ALVES, 2016; JIMÉNEZ-MUÑOZ *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017). Esses estudos são

unânicos em afirmar que há uma tend4ncia significativa de aumento na temperatura do ar na Amaz4nia. Dados observacionais mostraram aumento entre 0,6 a 0,7 °C na temperatura m4dia do ar na Amaz4nia nas 4ltimas quatro d4cadas, principalmente durante a esta4o seca. Ainda merece destaque o ano 2016, considerado como o ano mais quente dos 4ltimos 50 anos, seguido pelo ano de 1998, ambos associados ao fen4meno El Ni4o (MARENGO *et al.*, 2018).

Recentemente, ESPINOZA *et al.*, (2019) avaliaram a frequ4ncia de dias secos e 4midos na Amaz4nia no per4odo de 1981–2017. Os autores observaram que a frequ4ncia de dias secos (n4mero de dias no ano com precipita4o abaixo de 1,0 mm/dia) vem aumentando no sul da Amazonia, principalmente nos meses de setembro/outubro/novembro que corresponde ao in4cio da esta4o chuvosa. Já no norte da Amazonia a frequ4ncia de dias chuvosos (n4mero de dias no ano com precipita4o superior a 10 mm) vem aumentando principalmente nos meses de mar4o/abril/maio. Esse comportamento vem sendo observado na Amazonia nos 4ltimos anos, tend4ncia de diminui4o da precipita4o na parte sul e tend4ncia de aumento da precipita4o na parte norte (MARENGO *et al.*, 2018).

Os estudos sobre variabilidade e mudan4as climáticas ainda trazem muitas incertezas em seus resultados, contudo, sugerem que eventos de secas devem se intensificar neste s4culo (MARENGO e ESPINOSA, 2016). Esses autores relatam que eventos de secas e enchentes na Amaz4nia tem ocorrido com mais frequ4ncia nas duas 4ltimas d4cadas, e alguns desses eventos estão associados (mais não exclusivamente) a ocorr4ncias das diferentes fases do El Ni4o - Oscila4o Sul (ENOS). Eles ainda descrevem que anomalias no transporte de umidade do Oceano Atlântico Tropical para Amaz4nia e tamb4m da parte norte para a parte sul da Amaz4nia alteram o ciclo hidrol4gico da região ano a ano.

O ciclo hidrol4gico na Amaz4nia tem um papel importante de reciclagem de umidade da precipita4o e ainda  fundamental no transporte dessa umidade para outras regi4es do pa4s (MARENGO, 2006; ARRAUT *et al.*, 2012; NASCIMENTO *et al.*, 2016). Devido ao ciclo sazonal da chuva na Amaz4nia os rios apresentam os seus n4veis mais altos poucos meses ap4s as chuvas mais intensas. Segundo MARENGO (2005), os picos no n4vel do rio principal na Amaz4nia são detectados de 3 a 4 meses ap4s o pico de chuva. Conseq4entemente na Amaz4nia per4odos de seca meteorol4gica com poucas chuvas na esta4o chuvosa, são seguidos por per4odos de seca hidrol4gica, com n4veis baixos dos rios na esta4o de cheia (MARENGO *et al.*, 2013).

2.2 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os processos físicos que controlam a distribuição e o movimento da água na bacia hidrográfica são melhor compreendidos quando descritos como parte do ciclo hidrológico (TUCCI, 1998). O ciclo hidrológico pode ser dividido em componentes como: precipitação, interceptação, infiltração, escoamento superficial, escoamento subterrâneo, transpiração e evaporação. Buscando conhecer o comportamento dos processos físicos na bacia hidrográfica tem-se desenvolvido modelos que simulam as componentes do ciclo hidrológico (DEVI *et al.*, 2015).

Modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos tais como: tipos de variáveis utilizadas no modelo (estocástico ou determinístico), tipo de relação entre essas variáveis (empírico ou conceitual), a forma de representar os dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), a existência de dependência temporal (estatísticos ou dinâmicos) e a forma com que representa os sistemas (físicos, analíticos ou matemáticos). Uma descrição detalhada das características e classificações dos modelos hidrológicos foi apresentada por TUCCI (2005) e TODINI (2007).

Em geral, os modelos hidrológicos aplicados levam em conta a relação entre as variáveis sendo classificados em conceituais ou empíricos. Os modelos conceituais buscam simular as vazões observadas com base nos processos hidrológicos envolvidos e nas características físicas e topográficas da bacia. Há diversos modelos conceituais utilizados para previsibilidade de vazões, destacando os modelos Topographic Model - TOPMODEL, Soil and Water Assessment Tool - SWAT, Modelo de Grandes Bacias / Instituto de Pesquisa Hidráulicas - MGB/IPH e o Integrated Hydrologic Model - IHM (BEVEN *et al.*, 1984; ARNOLD, *et al.*, 1998; COLLISCHONN *et al.*, 2007; RAGAB e BROMLEY, 2010).

SERÃO *et al.*, (2020), utilizaram o modelo SWAT para simular a vazão na Bacia Hidrográfica Tocantins-Araguaia e avaliar o potencial de energia na usina hidrelétrica de Tucuruí instalada na bacia. Foram utilizados no trabalho 9 estações hidrometeorológicas com dados de 1979 a 2017. O período de 1979-1995 foi utilizado para rodar o modelo SWAT, período de 1995-2000 para calibração e, por fim, o período de 2000-2017 para validação. A vazão simulada apresentou excelentes resultados em comparação à vazão observada, reproduzindo a dinâmica da sazonalidade do fluxo. A produção de energia também apresentou

resultados satisfatórios, evidenciando que o modelo SWAT poderá auxiliar no planejamento de futuros empreendimentos energéticos no Brasil.

Por outro lado, os modelos empíricos capturam relações entre a variável preditora e a variável observada, sem necessariamente representar o comportamento físico dos processos envolvidos. Há um universo de possibilidades na utilização de modelos empíricos como: regressões múltiplas, redes neurais, modelos autoregressivos com médias móveis (ARMA e ARIMA), análises de componentes principais (MALFATTI *et al.*, 2018). Estes modelos levam alguma vantagem na aplicação em relação aos modelos conceituais, pois em geral, utilizam um número menor de dados de entrada na modelagem sendo de fácil ajuste e validação. Muitos estudos foram aplicados com estas técnicas nas simulações de vazões em bacias hidrográficas (HU *et al.*, 2007; REMESAN *et al.*, 2009, ALEXANDRE, 2012; FILHO e LALL, 2014; REMESAN *et al.*, 2018; MALFATTI *et al.*, 2018).

Os modelos hidrológicos chuva-vazão (conceituais ou empíricos) procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão no rio (ALMEIDA e SERRA, 2017). Estes modelos são ferramentas amplamente usados para extrapolar séries temporais de vazões no tempo e no espaço para aplicações operacionais e científicas, tais modelos permitem estender os registros de vazões disponíveis sendo possível prever o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas para diferentes cenários climáticos (WAGENER e WHATER, 2006).

A concepção de usar componentes principais na regressão de variáveis não é recente. A ideia foi inicialmente proposta por KENDALL (1957) discutindo sobre Análise Multivariada, seguido por HOTELLING (1957), e posteriormente uma aplicação clássica foi dado por JEFFERS (1967). Na técnica de regressão por componentes principais, em vez de regredir diretamente a variável dependente na variável explicativa, as componentes principais da variável explicativa são usados como regressores, ortogonalizando o problema da regressão e tornando os cálculos mais fáceis e estáveis (JOLLIFFE, 1982). Alguns trabalhos vêm utilizando modelos hidrológicos com a técnica de análise de componentes principais nas simulações de vazões (DUAN *et al.*, 2010, HU *et al.*, 2007, REMESAN *et al.*, 2018).

A técnica de regressão por componentes principais pode ajudar a resolver problemas de multicolinearidade na correlação entre o escoamento e as características da bacia durante as simulações hidrológicas (DUAN *et al.*, 2010). Esses autores desenvolveram um modelo de

regressão regional para a bacia do Rio Hailar na China correlacionando o escoamento anual com dados de precipitação, evaporação e outras características da bacia para o período de 1956 a 2006. Essa bacia é a principal fonte de água para indústria e agricultura local. Foi utilizado esta técnica de regressão e os resultados mostraram que o modelo se mostrou robusto, pois os escoamentos previstos são compatíveis com os correspondentes observados apresentando uma correlação satisfatória.

Modelo empírico de Regressão Linear Múltipla foi aplicado na bacia do rio Paraná para simular vazões mensais de rios na Usina Hidrelétrica de Itaipu (MALFATTI *et al.*, 2018). Foram utilizadas diferentes variáveis para simular a vazão defasadas no tempo de 0 até 12 meses, como: índices climáticos, precipitação e as vazões dos rios no período de 1980 a 2010. O trabalho permitiu identificar diferentes preditores de vazões na bacia com meses e defasagens específicos. A precipitação é a vazão como preditores na simulação apresentaram melhores desempenho nas defasagens mais curtas e os índices climáticos nas defasagens mais longas. Os preditores climáticos mais significativos nas simulações foram El Nino-Oscilação Sul e a temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical Sul, reforçando a importância das influências do clima na simulação de vazões, principalmente em previsões de longo prazo.

2.3 MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS E CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Um Modelo Climático Global (MCG) busca representar matematicamente o sistema climático baseado nas propriedades físicas de seus componentes, apresentam uma resolução espacial em média de 250 km, e são incompatíveis com as escalas regionais para estudos de impactos, deixando de representar características importantes em escala menor, como nuvens e topografia. Os MCG's atuais são acoplados com modelos oceânicos, que utilizam os campos de temperatura da superfície do mar (TSM) sobre os oceanos e também contemplam ainda processos biogeoquímicos. Assim, apesar de caracterizar bem as condições climáticas globais, são frágeis em capturar características climáticas regionais, principalmente em áreas com coberturas vegetais e topografias complexas, e regiões litorâneas (IPCC 2014 e IPCC, 2021).

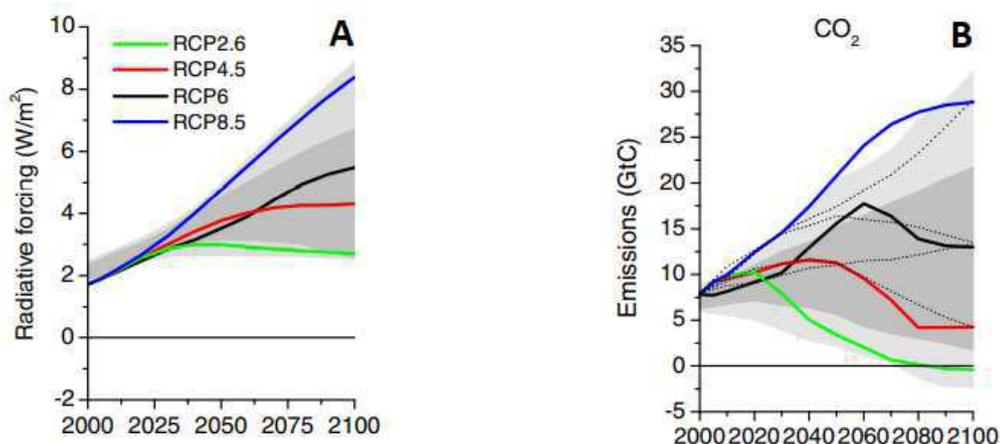
O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*), foi criado em 1988, desde então os MCG's e os cenários climáticos evoluíram bastante e passaram a gerar previsões climáticas futuras incorporando informações como: estimativas de gases de efeito estufa e cenários socioeconômico de vulnerabilidade (MOSS *et al.*, 2010). Os cenários atuais buscam abordar os

processos naturais e principalmente antropogênicos que influenciam no sistema climático como determinados padrões de emissões de gases de efeito estufa e consequentemente o forçamento radiativo na atmosfera (VAN VUUREN *et al.*, 2011).

Os cenários de mudanças climáticas do quinto relatório de avaliação do IPCC (AR5, *Fifth Assessment Report*) substituem os padrões do Relatório Especial sobre Cenários de Emissões (SRES, *Special Report on Emissions Scenarios*) empregados nos dois relatórios anteriores. Os novos cenários são chamados de RCP (*Representative Concentration Pathway*) ou em português, Caminho Representativo de Concentração, e estão baseados nos cenários da forçante radiativa futuras, levando em consideração alterações no balanço entre a radiação de entrada e saída na atmosfera causados por mudanças nos componentes da atmosfera como exemplo o Dióxido de Carbono (MOSS *et al.*, 2010; TAYLOR *et al.*, 2012).

No CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*) do IPCC, foram projetados quatro cenários com os RCP's, são eles: RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5, os números indicativos em cada cenário referem-se ao forçamento radiativo pelos gases do efeito estufa, juntos abrangem a faixa de valores de forçamento radiativo variando de 2,6 W/m² a 8,5 W/m² (VAN VUUREN *et al.*, 2011). A Figura 1, mostra o forçamento radiativo (Figura 1A) e emissões do CO₂ (Figura 1B) nos quatro cenários com projeções até 2100, assim como sua variabilidade nos cenários a partir do ano de 2025. Destaca-se, o cenário otimista (RCP 2.6) que projeta estabilização no forçamento radiativo a partir de 2050 e cenário pessimista (RCP 8.5) que eleva significativamente o forçamento radiativo até 2100.

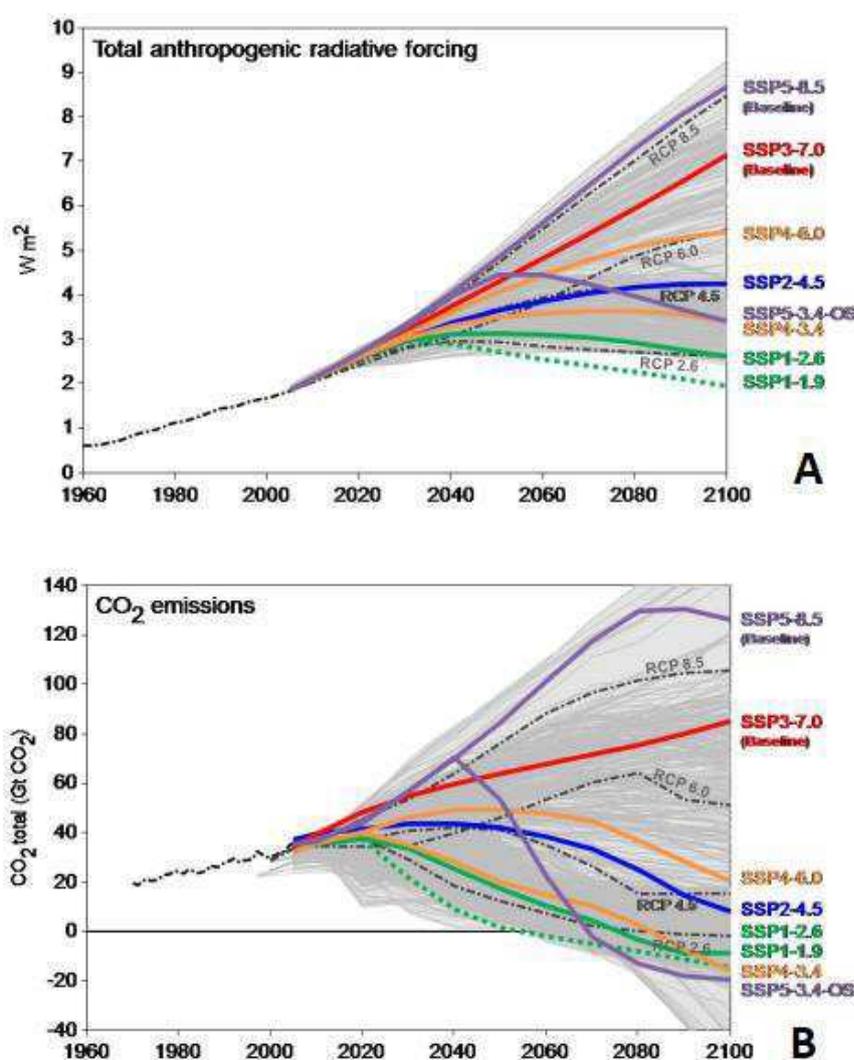
Figura 1 - Forçamento radiativo (A) e emissões de CO₂ (B) dos RCP's.



Fonte: Adaptado de VAN VUUREN *et al.*, (2011).

O atual relatório do IPCC publicado em 2021 (AR6), além de manter as projeções dos níveis de forçamento radiativo semelhantes aos RCP's do CMIP5, contempla novos cenários que incluem o sequestro de carbono. Estes novos cenários são chamados de SSP's (*Shared Socio-Economic Pathways*) ou em português, Caminhos Socioeconômicos Compartilhados. Uma revisão detalhada sobre o CMIP6 e os SSP's pode ser encontrada em EYRING *et al.*, 2016 e O'NEILL *et al.*, 2016. Embora os novos cenários apresentem forçamento radiativo semelhantes no final de 2100, os caminhos das emissões do CO₂ são diferentes (IPCC, 2021). A Figura 2, mostra a comparação do forçamento radiativo (Figura 2A) e das emissões do CO₂ (Figura 2B), nos cenários RCP's e nos novos cenários SSP's.

Figura 2 - Forçamento radiativo (A) e emissões do CO₂ (B) nos RCP's e SSP's.



Fonte: Adaptado de O'NEILL *et al.*, (2016).

Há grandes incertezas nas simulações dos MCG's, na relação entre os padrões de precipitação e as mudanças climáticas (WOLDEMESKEL *et al.*, 2012). Devido a resolução dos MCG's, se faz necessário um processo de Downscaling, transferindo as informações de grande escala para uma escala regional ou local (ADDOR e SEIBERT, 2014). Esses modelos ainda são forçados por um conjunto de condições de contornos determinados por cenários de emissões que também agregam incertezas nas projeções (HAKALA *et al.*, 2012). Essas questões podem levar a projeções irrealistas da precipitação e dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia (SHERESTHA *et al.*, 2016; MERESA e ROMANOWISK, 2017). Algumas opções como aplicação de conjuntos de vários modelos (ensemble) e um pós-processamento estatístico nos dados para remoção do viés podem reduzir as incertezas dos impactos das mudanças climáticas (KUNDZEWICZ *et al.*, 2018; HATTERMANN *et al.*, 2020).

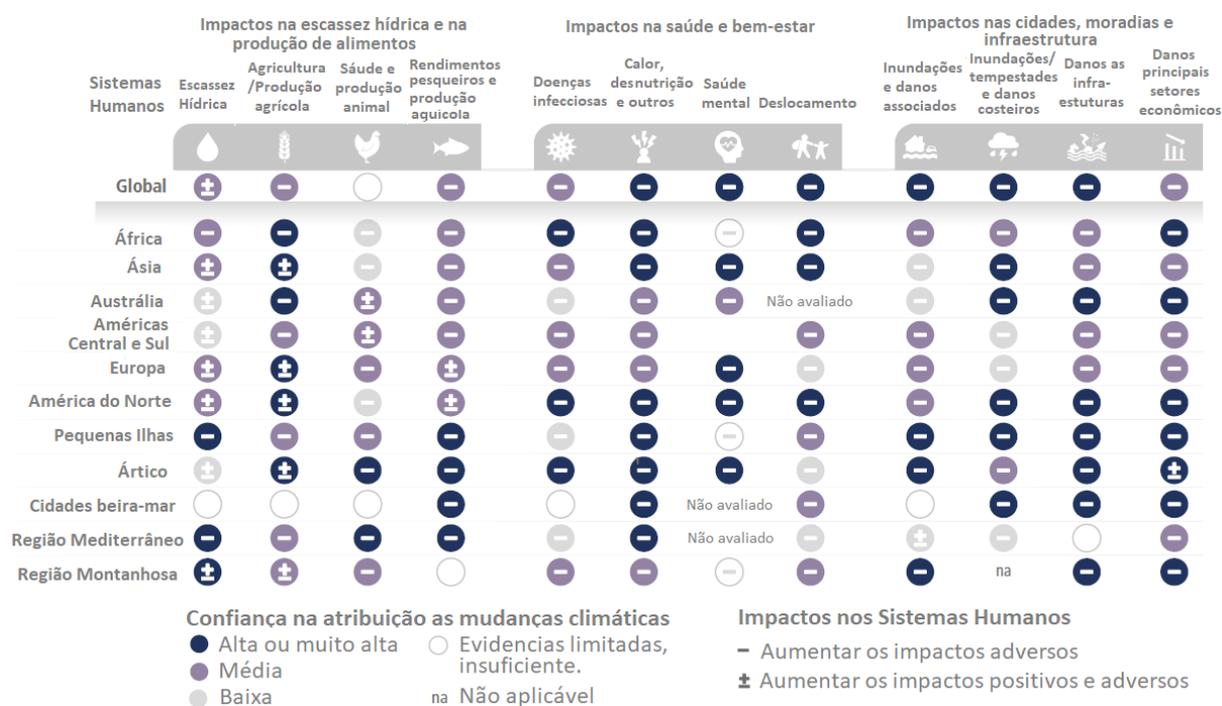
Diversos trabalhos utilizaram os cenários do CMIP5 para avaliar a precipitação sobre a América do Sul (JOETZJER *et al.*, 2013, YIN *et al.*, 2013, CHOU *et al.*, 2014). Estudos relatam que os modelos numéricos são frágeis em capturar aspectos importantes da variabilidade climática na Amazônia (MARTINS *et al.*, 2015). Estes autores, avaliaram as inter-relações entre precipitação regional, convergência de umidade e a temperatura da superfície do mar nos oceanos Atlântico e Pacífico Tropical. Foram utilizadas 21 simulações numéricas do CMIP5 durante para o período de 1979-2005, nos meses de junho, julho e agosto (inverno) e dezembro, janeiro e fevereiro (verão), para representar as características das estações seca e chuvosa respectivamente. Os resultados mostraram subestimativa da precipitação, contudo, na estação seca os modelos subestimaram duas vezes mais a precipitação do que na estação chuvosa. Os autores concluíram que a fraca representação dos sistemas produtores de precipitação na Amazônia pelos modelos e a dificuldade de representar adequadamente a variabilidade da temperatura da superfície do mar nos oceanos Pacífico e Atlântico podem ser responsáveis pela subestimativa da precipitação na Amazonia.

Alguns trabalhos apontam para possíveis cenários de mudanças climáticas na América do Sul e no Brasil até o final deste século (CHOU *et al.*, 2014, DOS SANTOS *et al.*, 2020, DE MOURA *et al.*, 2020). Para Amazônia, em geral todas as projeções indicam redução na precipitação e conseqüentemente na vazão (MARTINS *et al.*, 2015; GUIMBERTEAU *et al.*, 2016) e aumento na temperatura nos cenários avaliados na bacia (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Evidências apontam que as mudanças observadas no clima devem afetar diversas atividades no mundo como: logística, saúde, agricultura, produção de energia entre outras (ARAUJO *et al.*, 2014; VON RANDOW *et al.*, 2018; BANCO DO BRASIL, 2019; NETO *et al.*, 2020; DE OLIVEIRA *et al.*, 2021). Contudo, o entendimento do quantitativo dos impactos nas atividades econômicas ainda é fraco (NOBRE e MARENGO, 2017).

Recentemente, o último relatório do IPCC/AR6 apontou os principais impactos das mudanças climáticas observados nos sistemas humanos em todo o mundo (IPCC, 2022), ainda destacou o grau de confiança na atribuição desses impactos as mudanças climáticas (Figura 3). Os principais impactos citados no relatório são: impactos na escassez hídrica e produção de alimentos, impactos na saúde e bem-estar e os impactos nas cidades, moradias e infraestrutura. Em escala global, são atribuídos uma confiança de alta a muito alta nos impactos associados as mudanças climáticas a problemas como: calor e desnutrição, saúde mental, problemas de deslocamento, inundações e danos as infraestruturas.

Figura 3 - Resumo dos principais impactos das mudanças climáticas observados nos sistemas humanos em todo o mundo.



Fonte: Adaptado IPCC/AR6 (2022).

2.4 DOWNSCALING ESTATÍSTICO

A técnica de Downscaling Estatístico (DE) é conhecida como método de desagregação ou refinamento estatístico, podendo ser de ordem temporal, espacial, ou pela combinação destas duas dimensões (CHOW *et al.*, 2014). Uma revisão detalhada sobre os métodos de downscaling estatístico é apresentada em FOWLER *et al.*, (2007). A técnica envolve uma abordagem estatística baseada no princípio que aspectos do clima local são condicionados por dois fatores, os fatores de grande escala que envolvem aspectos da circulação global como: El Niño/Oscilação Sul e Dipolo do Atlântico e características locais como: topografia, uso e ocupação do solo e circulações locais nas regiões costeiras e lagos (WILBY *et al.*, 2014).

Os métodos de DE podem ser classificados em três categorias distintas, segundo WILBY *et al.*, 2014. Primeiro, os métodos baseados na classificação de padrões de tempo, onde variáveis climáticas locais são relacionadas com classes de tempo de escala sinótica. Segundo, os métodos geradores de tempo, são modelos que produzem series temporais sintéticas de variáveis meteorológicas para determinado local. Por fim, os modelos de regressão, estes ultimo estimam relações quantitativas entre preditores de MCG e variáveis prognosticas locais, utilizando modelos empíricos (FOWLER *et al.*, 2007 e MENDES *et al.*, 2009).

Hoje os modelos de downscaling estatístico (*Statistical DownScaling Model - SDM*) ocupam espaço antes dominado pelos modelos de downscaling dinâmico, que eram restritos a grandes instituições de ensino e pesquisa. O downscaling estatístico é comprovada como uma técnica robusta e com certa facilidade computacional, no qual permite a geração de series temporais de mudanças climáticas para locais onde há dados diários observados suficientes para calibração dos modelos e saídas dos MCG's atuais (SILVA, 2014). Assim, a utilização do DE se tornou um método eficiente para reduzir a dificuldade ao acesso a informações mais regionalizadas de mudanças climáticas e a sofisticação para gerar tais informações.

Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos utilizando a técnica de downscaling estatístico na geração de informações locais a partir de integrações de modelos de circulação global da atmosfera (KAZMI *et al.*, 2014; HERTIG *et al.*, 2018). ZORITA e STORCH (1999), aplicaram o método de análogo como técnica simples de downscaling estatístico na redução de escala de um MCG para simulação da precipitação mensal e diária no período de inverno na Península Ibérica e comparou com outros métodos mais complexos do tipo correlações canônicas e redes neurais. De uma maneira geral, o método de análogo, obteve resultados

satisfatórios comparados aos outros métodos utilizados e pode ser aplicado a variáveis locais com distribuição normal ou não. Para os autores os métodos de redes neurais são mais complexos e não oferecem diretamente uma relação física nos resultados.

No Brasil, alguns trabalhos utilizando a técnica de downscaling estatístico também foram desenvolvidos (RAMÍREZ, *et al.*, 2006; MENDES e MARENGO, 2010; DA SILVA, 2014). O Trabalho de MENDES e MARENGO (2010), aplicou a técnica de downscaling estatístico na simulação de precipitação diária em uma região da Bacia Amazônica usando três cenários do IPCC AR4 (A2, A1B e B1). No trabalho citado, foram utilizados dois métodos no SDM: método de rede neurais e modelo de autocorreções. De uma maneira geral o método de redes neurais apresentou desempenho superior ao de autocorrelações na simulação da variabilidade da precipitação diária na bacia Amazônica.

KIRKOGEI *et al.*, (2017) utilizaram o DE na simulação da precipitação de outubro a dezembro na África Oriental no período de 1982-2011, foram utilizados na previsão sazonal dois MCG's (CFSv2 e FDL-FLOR). O método utilizou análise de correlação canônica para relacionar a variabilidade na precipitação prevista em grande escala (caracterizando a variabilidade prevista do El Niño Oscilação Sul e do dipolo no Oceano Índico) à variabilidade local observada no Quênia e na Tanzânia. Os dados de precipitação do Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data (CHIRPS), foram usados como referência para o downscaling. A avaliação das previsões mostra uma habilidade positiva na previsão a longo prazo melhor do que documentada em estudos anteriores para a região. Para os autores, o DE na previsão climática é uma ferramenta importante na geração de produtos confiáveis em vários setores, incluindo planejamento agrícola e tomada de decisões.

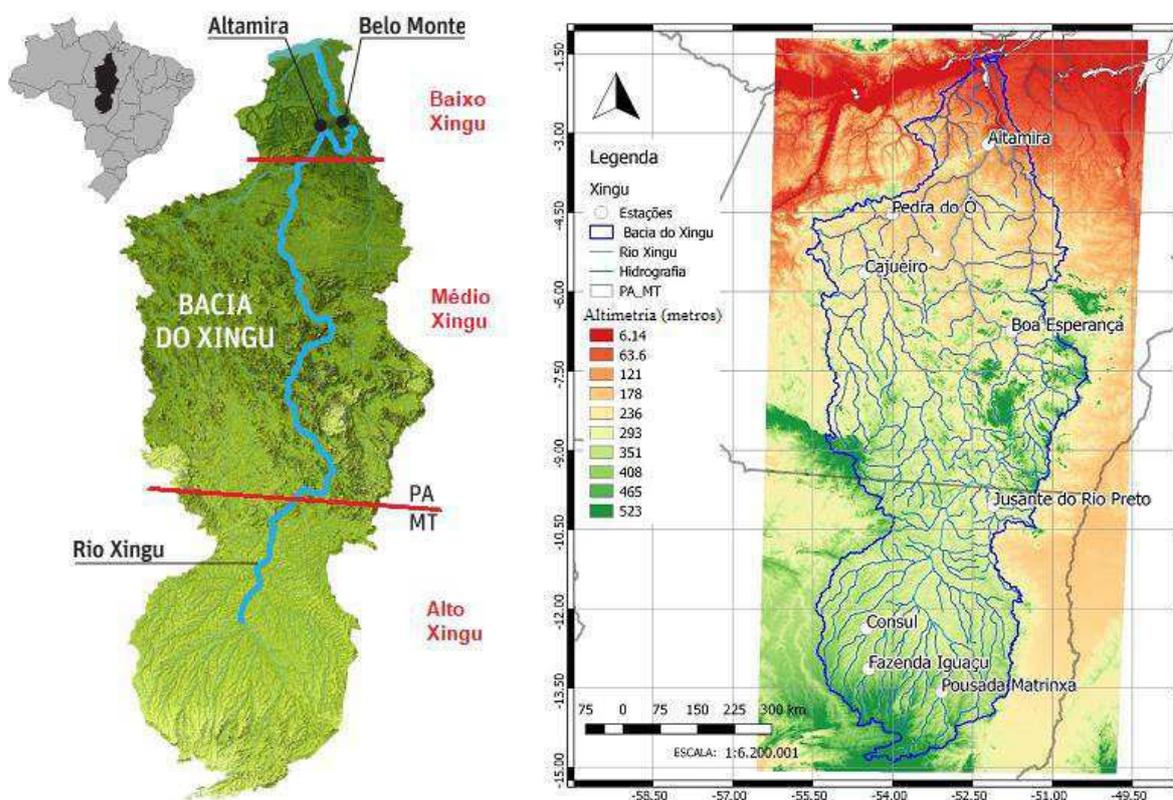
SADDIQUE *et al.*, (2019) aplicaram o DE nas saídas dos modelos do CMIP5 em uma região montanhosa com dados escassos no norte do Paquistão para projetar possíveis padrões futuros de precipitação e temperatura para horizonte até 2080. Os dados meteorológicos locais observados entre 1961-1990 foram utilizados no downscaling com três MCG's (CanESM2, BCC-CSM1-1 e MICROC5) sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Os resultados do SDM que utilizou regressão linear múltipla foram ligeiramente melhores durante a validação e as simulações mostraram que o modelo BCC-CSM1-1 teve melhor desempenho que os demais na região estudada. Em ambos cenários de RCP, as projeções futuras indicam aumento de temperatura e precipitação na bacia do rio Jhelum, compartilhada pelo Paquistão e Índia.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A BHX (Figura 4), com cerca de 13% da Bacia Amazônica inserida no território brasileiro está localizada nos Estados do Pará e Mato Grosso, possui uma área de drenagem em torno de 510.000 km². O rio principal Xingu, nasce em Mato Grosso na cota de 600 metros de altitude no encontro das Serras Formosa e Roncador no cerrado brasileiro e se uni ao bioma amazônico percorrendo uma extensão de aproximadamente 2.000 km até sua foz no Rio Amazonas na cota de 4 metros de altitude. A BHX tem direção no sentido sul-norte, está dividida basicamente em três regiões: Alto Xingu, Médio Xingu e Baixo Xingu. Um aspecto importante dos trechos Alto e Médio Xingu é a presença de unidades de conservação e, principalmente, de terras indígenas que conferem à região um bom grau de preservação. Os principais afluentes do rio Xingu são os rios Iriri, Fresco, Curuá, Comandante Fontoura, Culuene e Bacajá (ANA, 2013 e CPRM, 2019).

Figura 4 - Localização da BHX, Altamira e Belo Monte (esquerda), estações fluviométricas e altimetria da BHX (direita).

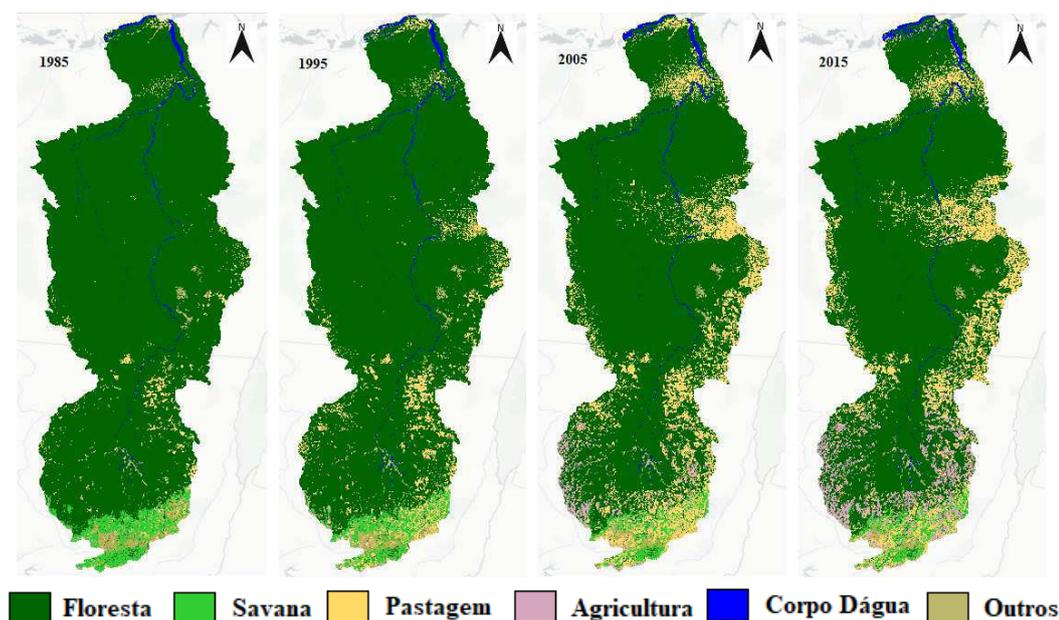


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Há 43 municípios brasileiros inseridos total ou parcialmente na BHX, onde 29 pertencem ao Estado do Mato Grosso e 14 ao Estado do Pará. Destaca-se em relação a área o município de Altamira no Pará, considerado o maior município brasileiro, está totalmente inserido na bacia. Uma extensa área da BHX é ocupada por terras indígenas e áreas de proteção ambiental, porém, observa-se um avanço significativo das atividades de agricultura e pecuária na bacia (ANA, 2013). Embora o crescimento populacional venha aumentando nas últimas décadas, principalmente em Altamira com a construção de Belo Monte, todos os municípios na BHX possui pouca densidade populacional com menos de 100.000 habitantes e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), abaixo da média nacional (IBGE, 2010).

A Figura 5, mostra mapas temáticos elaborados no MapBiomias mostrando a evolução dos principais uso e cobertura do solo na BHX ao longo das últimas décadas, sendo os anos de 1985, 1995, 2005 e 2015 representativos de cada década. É possível observar a expansão das áreas de pastagem e agricultura na bacia, principalmente nas últimas duas décadas. Segundo dados estatísticos do MapBiomias, de 1985 a 2015, houve uma redução de 16,4% nas áreas florestais e um aumento nas áreas agrícolas (soma da área de uso e cobertura para pastagem e agricultura) de quase 6 vezes. Em geral, as mudanças mais significativas no uso e cobertura da terra são observadas nas áreas leste e sul da bacia (Médio e Alto Xingu, respectivamente).

Figura 5 - Composição espacial das imagens do uso e cobertura do solo na BHX para o período de 1985 -2015 (MapBiomias, 2019).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A vegetação predominante na área da BHX é a floresta ombrófila densa (ocupa 35,1% da área total), seguida pela floresta ombrófila aberta (15,5%) e a vegetação de Cerrado (6,7%). As áreas de tensão ecológica (representam 19,8% da área total), uso antrópico (18,9%), água (1,5%) e outros usos e ocupação (2,5%). Do ponto de vista geológico, o Rio Xingu atravessa, de sul para norte, três compartimentos geológicos: bacia sedimentar dos Parecis, o cráton do Amazonas e a bacia sedimentar do Amazonas (ANA, 2013).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia, baseado nos mapas das “Normais Climatológicas de 1981-2010” (INMET, 2020), a climatologia das temperaturas do ar na BHX apresenta valores de temperatura média compensada anual entre 26 e 28 °C, temperatura mínima anual entre 20 e 24 °C e temperatura máxima anual entre 31 e 33 °C. Na parte sul da bacia (Alto Xingu) verifica-se as maiores amplitudes térmicas. A umidade relativa do ar apresenta valores acima de 80% em quase todos os meses do ano principalmente na porção centro e norte da bacia (Médio e Baixo Xingu, respectivamente). Já a parte sul apresenta valores menores de 80%, principalmente nos meses de inverno.

A variabilidade temporal e espacial da precipitação na BHX apresenta um regime um pouco diferenciado entre as partes norte e sul da bacia. Na parte sul e centro da bacia os maiores volumes de precipitação são observados nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, oriundos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Já na parte norte, os maiores volumes de precipitação são observados nos meses de fevereiro, março e abril, nesse período a parte norte da BHX está sobre influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema meteorológico precipitante na Amazônia (REBOITA *et al.*, 2010; DOS SANTOS *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2017, DE AZAMBUJA, 2018).

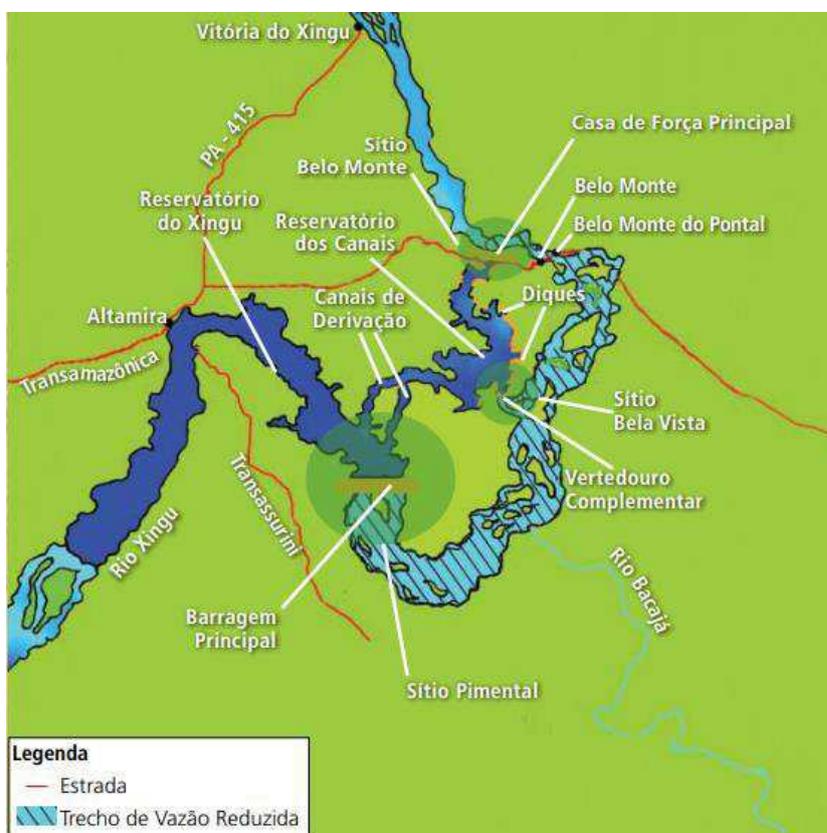
As vazões características na BHX (QMLT – vazão média de longo termo e Q95 – vazão com permanência de 95% do tempo) foram calculadas pela ANA a partir das séries de vazões médias mensais das estações fluviométricas (ANA, 2013). O estudo mostra que a BHX tem uma vazão média de longo termo de 8.548 m³/s e uma disponibilidade hídrica de 1.184 m³/s (vazão com permanência de 95%). A disponibilidade hídrica é a quantidade de água efetivamente disponível para os diversos usos na bacia. Assim, a identificação das disponibilidades das vazões comprometidas com o atendimento de demandas constitui parte indispensável de um plano de recursos hídricos.

3.1.1 COMPLEXO HIDRELÉTRICO DE BELO MONTE

Estudos para o aproveitamento hidrelétrico do rio Xingu vem sendo discutido desde 1975, e muitos debates, polêmicas e modificações no projeto original surgiram nesse percurso, contudo, somente em junho de 2010 o IBAMA emite a Licença de Instalação nº 795/2011 e as obras do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte (CHBM) foram iniciadas. Em abril de 2016 o CHBM começa a operar com sua primeira unidade geradora funcionando. As obras do Complexo de Belo Monte foram concluídas em novembro de 2019 (NORTE ENERGIA, 2019).

Um dos maiores empreendimentos energéticos do Brasil o CHBM foi construído no rio Xingu, nos municípios de Altamira e Vitória do Xingu, no Estado do Pará. A área total do reservatório é de 478 km² e sua capacidade nominal instalada está estimada em 11.233,1 MW e quantidade média de geração de energia de 4.571 MW. O CHBM que é uma usina a fio d'água, se caracteriza por apresentar dois sítios distintos: o sítio Pimental (barramento e usina auxiliar) e o sítio Belo Monte (casa de força principal), mostrados na Figura 6. A distância entre os dois sítios em linha reta é de aproximadamente 40 km (DE MENEZES *et al.*, 2017).

Figura 6 - Arranjo geral do Complexo Hidrelétrico de Belo Monte na BHX.



Fonte: ELETROBRAS, 2009.

As características técnicas e operativas do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte estão descritas na Tabela 1, constam na Nota Técnica EPE-DEE-RE-004/2010-r0 (EPE, 2010). Esses dados não podem ser alterados sem prévia aprovação formal do Ministério de Minas e Energia - MME, ouvida a Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Dados energéticos da casa de força principal e auxiliar do CHBM, estão disponíveis no ANEXO - Tabela A1.

Tabela 1. Características do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte (EPE, 2010).

Casa de Força	Potência Instalada (MW)	Energia Firme (MW médio)	Garantia Física (MW médio)	Garantia Total (MW médio)
Principal - Belo Monte	11.000	4.226	4.419	4.571
Auxiliar – Pimental	233,1	146	152	

Com o objetivo de garantir as condições necessárias para preservação do meio ambiente e qualidade de vidas das pessoas, como manutenção da fauna e navegabilidade no período de seca, foi definido uma vazão ecológica no Trecho de Vazão Reduzida (TVR) entre os sítios Pimental e Belo Monte (Figura 6). Ficando assim definido o Hidrograma Ecológico, com as vazões mínimas a ser mantido para atender os requisitos acima, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Hidrograma Ecológico de Belo Monte em $m^3.s^{-1}$ (EPE, 2010).

Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Hidrograma A	1.100	1.600	2.500	4.000	1.800	1.200	1.000	900	750	700	800	900
Hidrograma B	1.100	1.600	4.000	8.000	4.000	2.000	1.000	900	750	700	800	900

As vazões ecológicas mensais se diferem nos Hidrogramas A e B, nos meses de março a junho (período chuvoso), com o Hidrograma A mantendo a metade da vazão mensal no mês de abril do Hidrograma B. O estudo oficial de viabilidade do projeto indica que, se em qualquer ano a vazão média mensal não atingir $8.000 m^3.s^{-1}$ em qualquer mês do período de cheia, então, para o próximo ano, os operadores do projeto devem manter a opção de vazão ecológica do Hidrograma B.

Recentemente há uma quebra de braço entre o IBAMA e empresa NORTE ENERGIA S.A. (empreendedora do CHBM), sobre a necessidade de revisão do Hidrograma Ecológico de Belo Monte. Estudos baseados em parecer técnico de especialistas indicam que é necessária uma liberação maior de água no TVR para garantir a sobrevivência ecológica do rio em toda região da Volta Grande do Xingu, no Pará (IBAMA, 2021).

3.2 DADOS UTILIZADOS

Foram selecionadas para esta pesquisa oito estações fluviométricas com dados consistidos de vazões médias mensais entre o período de 1980 a 2016 localizadas ao longo da BHX. As estações foram selecionadas a partir do Inventário das Estações Fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2018) e extraídos com o software HidroWeb (versão 3.1.1). Informações adicionais como coordenadas geográficas, rio, área drenada, período de dados e porcentagem de falhas de cada estação estão descritas no ANEXO - Tabela A2. A estação fluviométrica de Altamira no exutório da BHX foi usada como referência para validação dos resultados das simulações das vazões e avaliação de cenários futuros.

No desenvolvimento deste estudo foram utilizados séries de dados diários de precipitação organizados em “*grids*” disponibilizados por XAVIER *et al.* (2016), no período de 1980 a 2016. Estes dados fazem parte de um projeto conjunto entre a Universidade do Texas (USA) e Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil), estão disponíveis em uma grade com resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para todo o território brasileiro. Com intuito de comparar e validar os resultados na pesquisa, foram utilizados os totais diários de precipitação observados na estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia em Altamira no Pará.

Optou-se por esta base de dados, pois em trabalho anterior, LUCAS *et al.* (2019) comparou os dados observados de precipitação de duas estações meteorológicas do INMET na BHX no período 1981 a 2010 (Altamira e São Félix do Xingu) com dados “*grids*” nos mesmos pontos das estações fornecidos por XAVIER *et al.* (2016) e pelo projeto CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations (FUNK *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2019). Os resultados mostraram que o conjunto de dados de XAVIER *et al.* (2016) em Altamira e São Félix do Xingu proporcionaram uma melhor representação dos totais diários e mensais de precipitação quando comparados aos dados de CHIRPS.

Esses conjuntos de dados foram utilizados na modelagem hidrológica empírica chuva-vazão, com o intuito de simular as vazões mensais na BHX. Além disso, os dados de precipitação foram usados para definir padrões climatológicos e identificar tendências no regime de chuva nas três regiões da bacia, por meio do teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall. Ainda foram avaliadas tendências nos indicadores de extremos climáticos de precipitação. Por fim, esse conjunto de dados permitiu na pesquisa fazer a simulação do potencial hidrelétrico da usina de Belo Monte em Altamira.

3.3 TESTE DE MANN-KENDALL

Foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Kendall (KENDALL, 1975), para identificar sinais de tendências nas séries de precipitação da BHX. Este é um teste eficiente para séries de dados que não seguem uma distribuição normal e menos sensível a valores extremos “outliers” (YAN *et al.*, 2015).

A estatística padronizada Z é calculada usando o desvio padrão (S) e a variância $Var(S)$ de acordo com a equação 1:

$$Z(s) = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

A estatística está próxima da normal quando n aumenta. Sendo a variância calculada pela equação 2:

$$Var(S) = \frac{n(n - 1)(2n + 5) - \sum_{i=1}^m t_i (i - 1)(2i + 5)}{18} \quad (2)$$

O teste estatístico Z é usado como medida de significância de tendência, quando $Z > 0$, a tendência está aumentando, para $Z < 0$, a tendência está diminuindo. Ao testar as tendências ao nível de significância escolhido ($\alpha = 0,05$), H_0 é rejeitada sempre que $Z(t) > Z_{\alpha/2}$ onde α é o nível de significância e $Z/2$ é a variável normalmente reduzida da função de distribuição normal padrão, então a hipótese nula é inválida, implicando que a tendência é significativa. No teste de Mann-Kendell aplicado, para valores de $p < 0,05$ indicam tendência estatisticamente significativa ao nível de confiança de 95%.

3.4 TESTE DE PETTITT

O teste de Pettitt (PETTITT, 1979), foi utilizado para detectar possíveis pontos de mudança nas séries de precipitação da BHX. Este teste é comumente aplicada para identificar “quebras de patamar” em séries temporais hidrológicas ou climáticas (POHLERT, 2020), e utiliza uma versão do teste de Mann-Whitney ($U_{t,T}$), que verifica se duas amostras X_1, \dots, X_T e X_{t+1}, \dots, X_T pertencem à mesma população ou não. O teste não paramétrico é definido pelas equações 3 e 4:

$$K_t = \text{Max } |U_{t,T}| \quad (3)$$

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (4)$$

para $t = 2, \dots, T$

A estatística ($U_{t,T}$) é então calculada para os valores de $1 < t < T$. Na hipótese nula e para cada t , a distribuição de ($U_{t,T}$) é simétrica em torno de zero com $K_t = 0$. Espera-se que haja grandes valores para K_t , quando houver um ponto de mudança nos dados. O ponto de mudança da série está localizado no K_t , desde que a estatística seja significativa. A probabilidade de significância de K_T pode ser calculada pela equação 5:

$$p = 2 \exp\{-6k_T^2 / (T^3 + T^2)\} \quad (5)$$

Onde:

p = nível de significância

K_t = é o valor crítico

T = é o número de dados na série.

Estudos desenvolvidos no Brasil em especial na Amazônia, avaliaram tendências e pontos de mudanças em séries de variáveis meteorológicas aplicando os testes de Mann-Kendall e Pettitt (DOS SANTOS, *et al.*, 2012; SALVIANO *et al.*, 2016; ALMEIDA *et al.*, 2017, DOS SANTOS e OLIVEIRA, 2017; DA SILVA *et al.*, 2018b). Primeiramente se faz necessário verificar a existência de normalidade na série de dados, sendo geralmente aplicado o teste de Shapiro-Wilk para essa verificação (SHAPIRO e WILK, 1965). Estes pré-requisitos metodológicos foram aplicados na realização desse trabalho.

3.5 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

Os índices de extremos climáticos avaliados neste trabalho estão entre os índices recomendados pelo ETCCDMI (*Expert Team for Climate Change Detection Monitoring and Indices*) da WMO (*World Meteorological Organization*), estes índices foram desenvolvidos por ZHANG, X. e YANG, F., 2004 no Climate Research Branch of Meteorological Service of Canada, aplicado por ZHANG *et al.*, 2011, estão disponíveis no aplicativo RClmDex (1.0), uma plataforma computacional aberta e acessível desenvolvida em linguagem R (versão 1.84).

Foram avaliados nove índices de extremos climáticos de precipitação pluvial na BHX (Rx1day, Rx5day, R1mm, R10mm, R20mm, SDII, CDD, CWD, PRECTOT), onde foram estimados alguns parâmetros estatísticos nos índices como tendência linear calculada pelo método de mínimos quadrados e nível de significância estatísticas das tendências determinado pelo teste de Fisher (valor p). Definição dos índices de precipitação aplicados estão descritos na Tabela 3.

Tabela 3. Índices extremos climáticos de precipitação utilizados.

Índices	Nome do indicador	Unidade
Rx1day	Máxima precipitação em um único dia	mm
Rx5day	Máxima precipitação em cinco dias consecutivos	mm
R1mm	Número de dias em um ano quando precipitação ≥ 1 mm	dias
R10mm	Número de dias em um ano quando precipitação ≥ 10 mm	dias
R20mm	Número de dias em um ano quando precipitação ≥ 20 mm	dias
SDII	Índice simples de intensidade diária de precipitação	mm/dia
CDD	Máximo número de dias consecutivos secos com PRP<1mm	dias
CWD	Máximo número de dias consecutivos úmidos com PRP ≥ 1 mm	dias
R95p	Dias úmidos quando precipitação > 95 percentil	mm
R99p	Dias extremamente úmidos quando precipitação > 99 percentil	mm
PRCPTOT	Total anual da precipitação nos dias chuvosos	mm

* PRP = Precipitação

O detalhamento da formulação metodológica de cada índice de extremos de precipitação utilizados no trabalho está descrito no APENDICE A.

3.6 REGRESSÃO POR COMPONENTES PRINCIPAIS

A regressão por componentes principais ou Principal Components Regression (PCR), foi inicialmente proposta por KENDALL (1975) e HOTELLING (1975). Essa técnica de regressão está baseada em Análises de Componentes Principais (ACP), no intuito de contornar dificuldades encontradas na Regressão Linear Múltipla (RLM), ou seja, eliminando problemas de multicolinearidade das variáveis, e também reduzindo a quantidade de ruído inserido no modelo. A PCR é frequentemente aplicada como método de redução de dimensionalidade sem acarretar perdas significativas de informações que estão contidas nos dados (OTTO, 1999).

Na técnica de PCR em vez de regredir diretamente a variável dependente (Y) na variável explicativa (X), as componentes principais da variável explicativa são usados como regressores. O algoritmo utilizado na PCR emprega etapas semelhantes a ACP para decompor a matriz de dados X, e então, relacionar os resultados da ACP aos dados da propriedade de interesse (PANERO, 2010). No método o processo é realizado em duas etapas, primeiramente é usada apenas a matriz X na determinação da combinação linear das variáveis (quando as variáveis independentes é descrita por uma modelagem de componentes principais, representamos a matriz X com sua matriz de escores T) e a etapa seguinte utiliza a RLM para estabelecer a relação entre a matriz Y e a matriz de escores T. Assim, aplica-se a ACP na matriz X e os resultados são então relacionados com as variáveis dependentes Y, conforme etapas e equações descritas abaixo:

1ª etapa - Aplica a ACP na matriz X.

$$XP = T \tag{6}$$

$$X = TP^T + E \tag{7}$$

2ª etapa – Correlaciona a matriz T, com as variáveis dependentes Y.

$$Y = Tb + F \tag{8}$$

$$b = (T^T T)^{-1} T^T y \tag{9}$$

Os escores são usados como regressores com o vetor y na equação, para estimar o coeficiente b e os erros E e F são as informações de X e Y respectivamente que não foram explicados pelo modelo. Na prática, o que se faz na realidade é decompor a matriz X, usando uma PCA e depois relacionar o vetor de Y a ela, usando uma RLM.

O detalhamento matemático sobre a aplicação desta técnica de análise estatística multivariada está descrita em RENCHER (2002) e IZENMAN (2008). As premissas da técnica de regressão por componentes principais são as mesmas usadas na regressão linear múltipla, como: linearidade, variação constante e independência. Como a regressão por componentes principais não fornece limites de confiança, a normalidade não precisa ser assumida.

A metodologia da técnica de PCR consiste, basicamente em eliminar as componentes principais que não contribuem na explicação da variância presente nos dados o que reduz a dimensionalidade dos dados originais. Após a escolha do número ótimo de componentes a serem incluídos na equação de predição os coeficientes podem ser obtidos por meio do método dos quadrados mínimos ordinários ou Ordinary Least Squares (OLS).

Uma das fragilidades da técnica PCR, ocorre quando o analito de interesse tem um sinal muito fraco. Neste caso, esse sinal não influencia fortemente na composição das primeiras componentes principais, fazendo com que haja a necessidade do uso de um número maior de componentes na construção do modelo (PANERO, 2010).

Frequentemente, as componentes principais com altas variâncias (aquelas baseadas em autovetores correspondentes aos autovalores da matriz de variância-covariância da amostra das variáveis explicativas) são selecionados como regressores. No entanto, com o objetivo de prever o resultado, as componentes principais com baixas variações também podem ser importantes na regressão. Portanto, a escolha do número de componentes principais é, uma etapa fundamental para uma adequada modelagem. Pois ao escolher o número de componentes principais a serem utilizadas corre-se o risco de perder informações contidas nos dados.

De modo geral, os modelos aplicados de regressão por componentes principais podem ser escritos seguindo uma notação usual, suponha que a equação de regressão possa ser escrita em forma de matriz como:

$$Y = XB + r \tag{10}$$

Onde, Y é a variável dependente, X representa a variável independente, B é o coeficiente de regressão a ser estimado e r representa o erro ou resíduo.

3.7 FERRAMENTA DE PREVISIBILIDADE

Existem algumas possibilidades de softwares e pacotes estatísticos disponíveis para aplicação da técnica de componentes principais, destacando-se: SPSS Statistics, Python e R Statistics. Nesta pesquisa foi utilizado o software CPT (*Climate Predictability Tool*), versão 15.6.3 na regressão por componentes principais para simulações de vazões médias mensais na BHX. Alguns trabalhos foram desenvolvidos utilizando esta ferramenta de previsibilidade climática (LUCIO *et al.*, 2010; KIPKOGEI *et al.*, 2017; ESQUIVAL *et al.*, 2018; LANDMAN *et al.*, 2019).

A Ferramenta CPT é um software desenvolvido pelo IRI (*International Research Institute for Climate and Society – Columbia University*), voltado para construção de modelos de previsão climática sazonal, simulações e validações de modelos com diferentes dados atualizados. Embora a ferramenta seja especificamente projetada para essas aplicações, ela pode ser usada em configurações mais gerais com qualquer dado de entrada utilizando basicamente três métodos de simulação: Análise de Correlação Canônica, Regressão de Componentes Principais ou Regressão Linear Múltipla para qualquer aplicação (MASON e TIPPETT, 2017; IRI, 2019).

O CPT utiliza dois conjuntos de dados nas simulações. O primeiro conjunto de dados contém as "variáveis X", chamadas de "preditores", "variáveis independentes" ou "variáveis explicativas". Essas variáveis X são usadas para prever as variáveis no segundo conjunto de dados, que deve conter as "variáveis Y", que são chamadas de "preditandos", "variáveis dependentes" ou "variáveis de resposta".

Neste trabalho foi utilizado o CPT, aplicando o método de PCR com os dados mensais de chuva como variáveis explicativa e as vazões mensais como variáveis de resposta. Na simulação, necessário definir o número mínimo e máximo de modos da PCR, sendo estes limitados aos mesmos valores de números mínimos e máximos das FOE (Funções Ortogonais Empíricas) das variáveis preditora (precipitação) e resposta (vazão). Na prática, o CPT tem apresentado melhores resultados com a seleção máxima de 10 modos para PCR e FOE (Lucio *et al.*, 2010), essa orientação foi seguida neste trabalho. Durante o processo de simulação a ferramenta CPT, determina o número ótimo dos modos acima para cada simulação mensal. As calibrações nas simulações são realizadas por meio de validação cruzada, incluída na ferramenta CPT.

3.8 AVALIADORES DE DESEMPENHO

Para avaliar o desempenho da pesquisa nas simulações das chuvas e vazões mensais na BHX, foram feitas comparações estatísticas nos resultados com os valores simulados e os respectivos valores observados. Foram calculados parâmetros estatísticos para avaliação de desempenho do modelo como coeficiente de correlação ou correlação de Pearson (r), descrito conforme apresentado na equação 11:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (11)$$

Onde, x e y são as variáveis explicativa e resposta a serem correlacionadas. O valor do coeficiente de correlação varia entre $-1 \leq r \leq 1$. Quando r tende ao valor 1, significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, para r próximo a -1 há uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui e $r = 0$ indica que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

A interpretação do coeficiente de correlação pode ser feita através de faixas, contudo, deve ser conhecer a natureza dos dados, tamanho da amostra e a relação entre as variáveis (TAYLOR, 1990). Em geral as faixas guias indicam correlação moderada para valores de r acima de 0,5; forte para valores acima de 0,7 e muito forte para valores acima de 0,9. Correlações fracas apresentam valores de r abaixo de 0,3 (BOZZONI *et al.*, 2020). Entretanto, a melhor maneira de verificar a qualidade do coeficiente de correlação obtido é por meio de um teste de hipótese, ou seja, um teste estatístico, como por exemplo o teste t-student.

Testes de significância ou hipótese com respeito aos vários valores de ρ requerem o conhecimento das distribuições amostrais de r . Para $\rho = 0$ esta distribuição é simétrica, e a estatística envolvendo a distribuição de student pode ser usada. Para $\rho \neq 0$, a distribuição é 'skewed' (alongada). Nestes casos uma transformação desenvolvida por Fisher produz uma estatística que é aproximada a distribuição normal.

Teste de Hipótese para $\rho = 0$. Aqui usamos a estatística de t-student:

$$t_{cal} = \frac{r \cdot \sqrt{N - 2}}{\sqrt{1 - r^2}} \quad (12)$$

em que t_{cal} é o valor a ser comparado com o t da função densidade de probabilidade da distribuição de student, obtido medindo o tamanho da área abaixo dessa função para valores maiores ou iguais a t , $N-2$ é o grau de liberdade da amostra. Neste caso N são os anos utilizados após o filtro da média móvel de nove, r é o coeficiente de correlação. Para o teste t-student, com amostra de 32 pares de valores, considera-se que para valores de t maiores ou iguais a 1,301, o grau de confiabilidade é de 90% ($p_valor = 0,1$); para t maior ou igual a 1,69, o grau de confiabilidade é de 95% ($p_valor = 0,05$) e para obter 99% de confiabilidade ($p_valor = 0,01$), o valor t precisa ser maior ou igual a 2,42 (estes valores são todos tabelados).

Outras métricas estatísticas também foram utilizadas na avaliação da simulação das vazões mensais incluindo o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CN) (NASH e SUTCLIFFE, 1970), VIES e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (WILKS, 2006), definidos respectivamente nas Equações (13) a (15). Sendo F os valores estimados pelo modelo, O os valores observados a serem comparados, \bar{O} os valores médios observados e n o número da amostra.

$$CN = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - F)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad (13)$$

$$VIES = \sum \frac{1}{n} (F - O) \quad (14)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (F - O)^2} \quad (15)$$

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é frequentemente usado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, podendo variar de $-\infty$ a 1. O valor de $CN = 1$ corresponde a um ajuste perfeito das vazões simuladas aos dados observados. Valores de CN entre 0 e 1 geralmente são vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto valores $CN < 0$ indicam que o valor médio observado é um preditor melhor do que o valor simulado, o que indica desempenho inaceitável. Valores entre $0,50 < CN < 0,65$ indicam um modelo de qualidade satisfatório nas simulações de vazões (MORIASI *et al.*, 2007).

Na avaliação dos resultados, o VIES indica a tendência de o modelo superestimar (se positivo) ou subestimar (se negativo), espera-se que o VIES seja sempre próximo de zero, indicando uma boa simulação dos modelos aplicados. A Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), foi utilizada para tentar obter uma indicação quantitativa do erro do modelo em termos da quantidade dimensionada.

3.9 CENARIOS CLIMÁTICOS E MCG's UTILIZADOS

Este trabalho examinou a influência das mudanças climáticas causadas pelo acúmulo de gases do efeito estufa com os cenários de forçamento radiativo projetado pelo IPCC (IPCC, 2014). Optou-se pelos cenários de mudanças climáticas RCP.4.5 e RCP 8.5 para a geração das séries de precipitação na BHX para o período 2021-2080. Estes cenários foram selecionados representando o cenário mais provável e menos provável de ocorrência (pessimista), respectivamente. Os resultados serão apresentados e avaliados em dois períodos distintos 2021-2050 e 2051 a 2080, compreendendo duas séries climatológicas de 30 anos. As características dos RCP's utilizados estão descritas na Tabela 4 (MOSS *et al.*, 2010; TAYLOR *et al.*, 2012).

Tabela 4. Características dos RCP's utilizados (Adaptado: MOSS *et al.*, 2010).

Cenários	Forçamento Radiativo	Concentração (p.p.m.)*
RCP 4.5	~ 4,5Wm ⁻² estabilização após 2100	~ 650 CO ₂ equivalente
RCP 8.5	> 8,5 Wm ⁻² em 2100	> 1.370 CO ₂ equivalente

* p.p.m - parte por milhão.

Os MCG's utilizados foram o “CanESM2” segunda geração do Modelo de Sistema Terrestre, do Centro Canadense de Modelagem e Análise Climática (ARORA *et al.*, 2009; CHRISTIAN *et al.*, 2010); “CNRM-CM5” Modelo Climático Global do Centro Nacional de Pesquisa Meteorológica da MeteoFrance (SALAS-MÉLIA *et al.*, 2005; VOLDOIRE *et al.*, 2013); “MPI-ESM-LR” Modelo de Sistema Terrestre do Instituto Max Planck para Meteorologia, da Alemanha (GIORGETTA *et al.*, 2013; MULLER *et al.*, 2018); e o “NORESM1-M” Modelo de Sistema Terrestre do Centro Climático da Noruega (BENTSEN *et al.*, 2013; GUO *et al.*, 2019).

De modo geral, os MCG's possuem três componentes (atmosférica, superfície e oceânica), além de suas parametrizações e esquemas específicos para tratar ciclo de carbono, balanço de radiação, aerossóis, processos hidrológicos e outros, sendo definidos como Modelos do Sistema Terrestre (CanESM2, MPI-ESM-LR, NORESM1-M). Já o modelo da MeteoFrance (CNRM-CM5), possui uma característica diferente, pois possui uma componente específica para tratar o gelo oceânico, assim é considerado como um modelo Atmosférico-Oceânico. Algumas características dos modelos acima estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5. Características dos MCG's utilizados (Adaptado: ZEBASE *et al.*, 2019).

Modelo	Tipo de Modelo	Resolução Horizontal	Níveis Verticais
CanESM2	ESM	2.8 x 2.8	35
CNRM-CM5	AO	1.4 x 1.4	31
MPI-ESM-LR	ESM	1.9 x 1.9	47
NORESM1-M'	ESM	2.5 x 1.9	26

ESM = Earth System Model, AO = Atmosphere - Ocean.

Os dados de precipitação foram gerados com o Portal de Downscaling Estatístico desenvolvido pelo Grupo de Meteorologia Santander (<http://www.meteo.unican.es>). O Método de Downscaling Estatístico aplicado utilizou dados diários de variáveis de grande escala de reanálises do projeto ERA-INT-DM no período de 1979-2010 com resolução espacial de 2.5° por 2.5° e dados diários de precipitação das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia na Amazônia no mesmo período (ANEXO - Tabela A3). A técnica consiste em encontrar uma relação empírica (um modelo estatístico) entre as variáveis de grande escala das reanálises (preditores) e as variáveis observadas em pequena escala (preditandos). Em seguida, modelo estatístico resultante é aplicado aos dados a partir de diferentes simulações de mudanças climáticas de MCG's e diferentes cenários (SILVA, 2014).

Na Figura 7 é apresentada a imagem da grade sobre a região Amazônia, onde foi realizado o experimento do downscaling estatístico para geração dos dados de precipitação pluvial. Nesta pesquisa foram utilizados os dados de precipitação com foco para área da BHX. Ainda são mostrados na Figura 7 informações sobre os dados de reanálises utilizados como preditores no downscaling estatístico: pressão ao nível médio do mar, umidade específica no nível 850 hpa, velocidade zonal e meridional em 850 hpa, geopotencial em 500 hpa e temperatura do ar no nível 850 hpa. Os dados de reanálise são derivados de modelos numéricos que reproduzem estados atmosféricos passados que são consistentes com as observações. Uma descrição detalhada sobre esta reanálise pode ser encontrada em DEE *et al.*, (2011), no qual descreve o modelo de previsão, o método de assimilação de dados e o conjunto de dados de entrada observados utilizados, ainda discuti as melhorias em relação aos dados da reanálise anterior, o ERA-40.

Figura 7 - Imagem da grade sobre a região Amazônia utilizada para estabelecer relações preditor (reanálises) e preditando (observações de superfície).



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O downscaling estatístico utilizou o método dos análogos onde foi validado após o período de treinamento. O período histórico comum para preditores (reanálises) e preditandos (observações) foi dividido para o período de treinamento entre os anos de 1979 a 2010 e o período de 2011 a 2020 para comparação dos resultados. A calibração utilizou os dados de treinamento para verificar a similaridade climática entre as observações e simulações, ou seja, se o clima passado foi bem representado pelos preditores oriundos da reanálise, relativa ao período de 1979 a 2010. As métricas estatísticas de natureza descritiva utilizadas estão descritas acima e os dados foram acumulados em valores mensais, pois serão utilizados no modelo para simulação das vazões mensais na BHX. Como informado anteriormente serão gerados cenários futuros de chuva e vazão mensais para dois períodos distintos 2021-2050 e 2051-2080.

Com base na subestimativa entre os valores de precipitação observados e simulados no período de treinamento e utilizado o método de escala linear foi estimado um fator de ajuste mensal nos dados de precipitação gerados no DE. Posteriormente, aplicou-se a remoção do viés, com base nesse fator de correção mensal nas series futuras de precipitação para cada estação simulada. Esta metodologia de correção do viés, acarreta em grandes benefícios a pesquisa conforme descrito por DE MOURA *et al.*, 2020. Segundo CHEN *et al.*, (2013), os resultados dos MCG's, são enviesados nas simulações da precipitação, o que resulta em vazões simuladas enviesadas. Porém, os métodos de correção de viés são capazes de ajustar a precipitação simulada e a representação das vazões nas bacias hidrográficas.

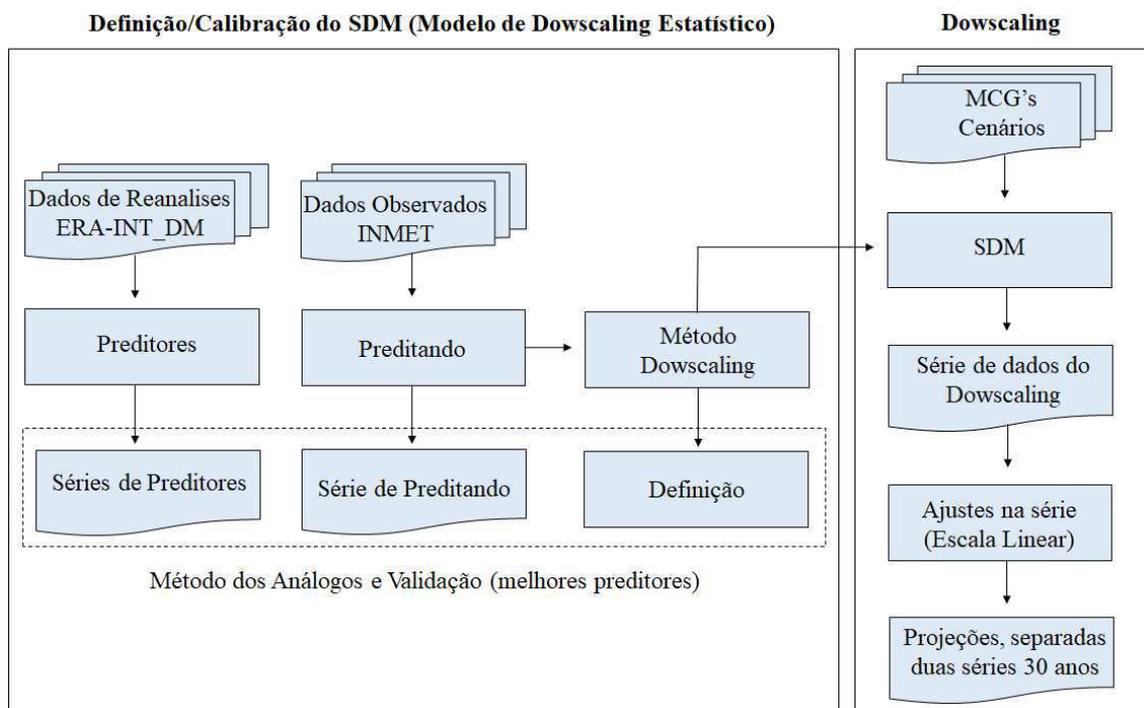
A escala linear é um método simples para corrigir variáveis com base na média de longo prazo observada (LENDERINK, *et al.*, 2007). A precipitação é ajustada pela multiplicação do valor simulado por um fator baseado na razão da média de longo prazo observada e simulada pelo modelo, conforme equação abaixo.

$$P_{sim}^{cor}(t) = P_{sim}(t) \cdot \left[\frac{u_{obs}^{hist}(t)}{u_{sim}^{hist}(t)} \right] \quad (16)$$

Onde $P_{sim}^{cor}(t)$ é a precipitação simulada ajustada para o tempo t , $P_{sim}(t)$ é a precipitação simulada para o tempo t , $u_{obs}^{hist}(t)$ é a precipitação média observada de longo prazo no período histórico e $u_{sim}^{hist}(t)$ é a precipitação média de longo prazo simulada no período histórico.

O esquema da Figura 8 sintetiza o fluxo no processo de downscaling com o modelo de DE aplicado no trabalho. Como descrito acima, além dos MCG's e cenários climáticos, foram utilizados dados de reanálises e dados locais observados de precipitação para realizar esse procedimento. Os detalhes da definição/calibração da abordagem estatística de redução de escala são mostrados na Figura 8.

Figura 8 - Esquema do processo de downscaling estatístico utilizado no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo Autor (2021).

3.10 ESTIMATIVA DO POTENCIAL HIDRELÉTRICO

Para cada cenário de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5, foram estimados o potencial de geração de energia na usina hidrelétrica de Belo Monte para dois períodos distintos 2021-2050 e 2051-2080 com base na vazão projetada em Altamira. Foi avaliado apenas a energia gerada pela barragem principal em Belo Monte, desconsiderando a energia na barragem auxiliar em Pimental, visto que a usina principal representa 98% da capacidade de geração de energia no complexo. O valor máximo de energia após a calibração foi estabelecido em 11.000 MW, o que representa a capacidade máxima instalada da usina de Belo Monte.

Conforme metodologia adotada e descrita por STICKLER *et al.*, (2013), o potencial de geração de energia em Belo Monte foi estimado em cada cenário usando a equação 17, definida com os dados usados no planejamento do CHMB:

$$P_m = \Delta h \cdot Q_m \cdot g \cdot EF \cdot CAE \quad (17)$$

Sendo P_m é o potencial médio hidrelétrico mensal (em megawatts); Δh é a diferença na queda, igual a 87,5 metros; Q_m é a vazão média mensal ajustada (em metros cúbicos por segundo); g é a força da gravidade, $9,81 \text{ m.s}^{-2}$; EF é o fator de eficiência atribuído as turbinas e geradores (0,918); e CAE é um fator de calibração adicional, este fator foi obtido dividindo a produção de energia média anual garantida citada no projeto (4419 MW) pelo potencial de geração de energia elétrica não calibrado da vazão média anual observados no período de treinamento entre 1981-2010.

Foram calibradas as vazões mensais projetadas para cada cenário com os dados usados no projeto para estimativa da projeção de produção mínima de energia em Belo Monte (Tabela 6). Primeiro passo foi calibrar a vazão simulada no período de 1981-2010 com a vazão média anual oficial observada usada no projeto. Foi calculado a relação entre o valor médio anual observado e o valor médio anual simulado com o ensemble dos modelos, onde foi obtido um fator de calibração igual a 0,96. Em seguida, reduzimos a vazão simulada pela vazão mínima que deve permanecer no rio em cada mês, conforme regulamentado pelo hidrograma da “vazão ecológica” estabelecida para o projeto. Ajustamos os valores de vazão para cada cenário ao longo do período dos 30 anos selecionados, subtraindo a quantidade de vazão mínima primária da vazão média mensal estimada e, em seguida, determinando se a vazão do ano subsequente seria minimizada pela opção de vazão ecológica A ou B.

Tabela 6 - Dados oficiais do projeto da usina de Belo Monte (EPE, 2010).

CHBM	Vazão (m³/s)	Vazão Ambiental (m³/s)	
	Meses	Média Anual*	Hidrograma A
Janeiro	9.546	1.100	1.100
Fevereiro	15.274	1.600	1.600
Março	20.640	2.500	4.000
Abril	20.845	4.000	8.000
Mai	15.841	1.800	4.000
Junho	7.263	1.200	2.000
Julho	3.378	1.000	1.200
Agosto	1.821	900	900
Setembro	1.281	750	750
Outubro	1.367	700	700
Novembro	2.209	800	800
Dezembro	4.492	900	900

Como Belo Monte não possui histórico de geração de energia (início de operação em novembro de 2019), a calibração adicional foi realizada para comparar os resultados obtidos no trabalho com aqueles relatados nos documentos oficiais do projeto. Os cálculos não consideram o efeito do reservatório de 440 km² criado pela barragem, pois não é grande o suficiente para alterar o projeto a fio d'água do complexo. Correções adicionais podem ter sido realizadas pelos elaboradores do projeto; assim, a estimativa da energia potencial de geração em todos os cenários provavelmente difere do descrito no projeto.

A vazão média mensal para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nos dois períodos selecionados foi estimada com a técnica de PCR no CPT, utilizando a precipitação pluvial média mensal do ensemble dos modelos utilizados no trabalho. Assim, serão avaliados e discutidos os resultados gerados das médias mensais de chuva e vazão em Altamira e o potencial médio de geração de energia em Belo Monte nos períodos de 2021-2050 e 2051-2080.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CLIMATOLOGIA E TENDÊNCIA DA PRECIPITAÇÃO NA BHX

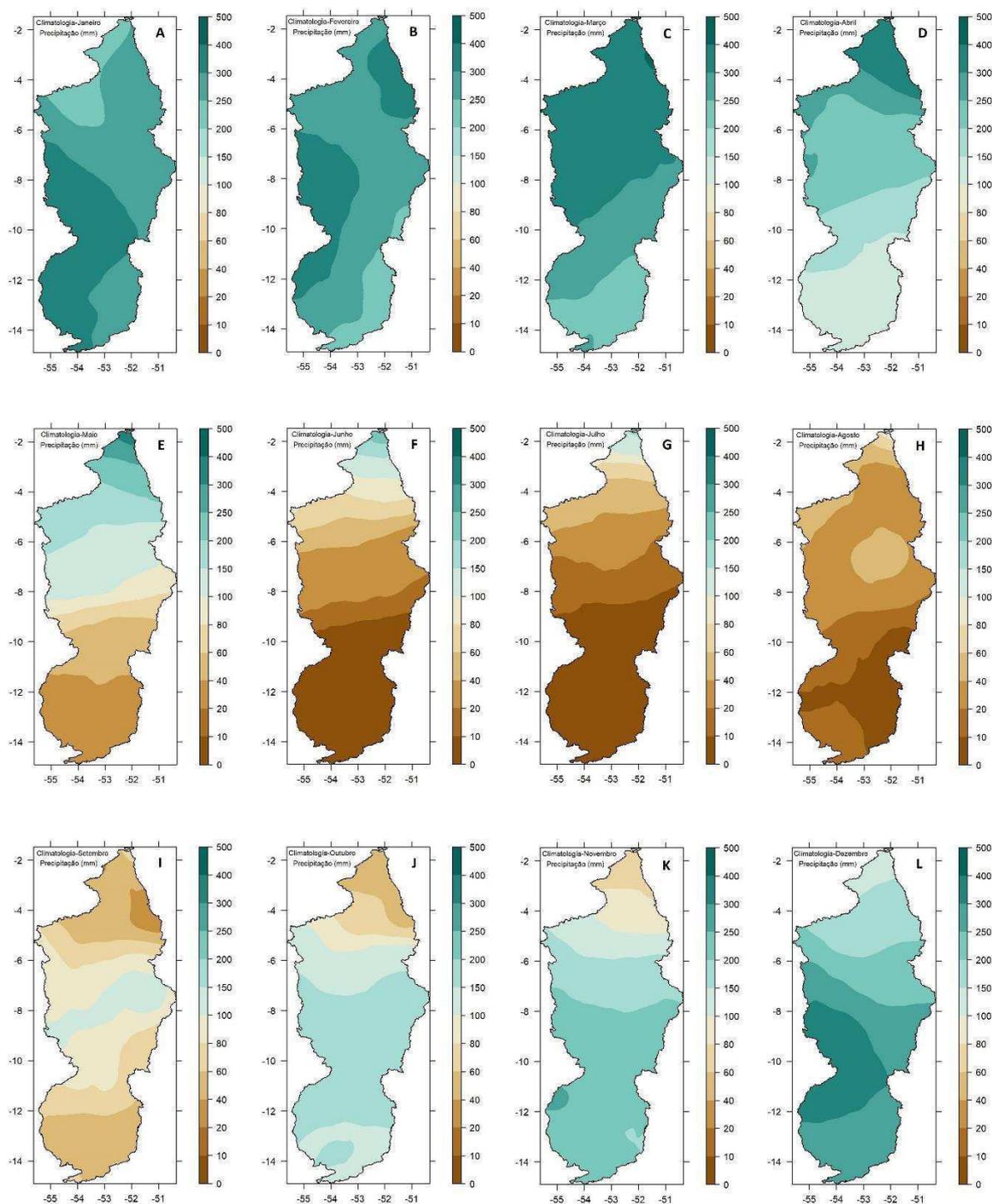
4.1.1 *Climatologia da Precipitação Pluvial*

Na elaboração do trabalho, foram geradas a climatologia mensal e anual da precipitação pluvial na BHX para o período 1981-2010 com os dados disponibilizados por XAVIER *et al.*, (2016). As composições espaciais da variável (mapas) foram elaboradas por interpolação utilizado o método IDW - Inverse Distance Weighted (Borges *et al.*, 2016). O período corresponde a uma Normal Climatológica de referência conforme orientação da OMM.

São discutidos a variabilidade temporal (sazonalidade) e espacial da precipitação pluvial na BHX. De acordo com a Figura 9, nos meses de fevereiro, março e abril a parte norte da bacia (Baixo Xingu), experimenta volumes mensais de chuva consideráveis acima de 300 mm (Figuras 9B, 9C e 9D). Ainda na Figura 9C, pode ser observado que no mês de março os volumes expressivos de chuvas se estendem até parte da região central da bacia. Neste período (fevereiro a abril) a porção norte da Amazônia está sobre influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), atuando como sistema meteorológico precipitante, trabalhos apontam que em anos onde a temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Sul está mais aquecida esse sistema pode atingir até 5° sul de latitude (REBOITA *et al.*, 2010, LINDENBERG e SILVA, 2016). Na parte sul da bacia (Alto Xingu) os três meses mais chuvosos são dezembro, janeiro e fevereiro (Figuras 9L, 9A e 9B), ou seja, no verão, enquanto os meses mais secos são junho, julho e agosto, no inverno (Figuras 9F, 9G e 9H), que representa um regime típico de monções (REBOITA *et al.*, 2010).

Entre os meses de maio a setembro (Figuras 9E a 9I) são observados os menores volumes de chuva em especial na parte sul e centro da bacia (Alto e Médio Xingu). A ausência de chuvas nestas áreas durante este período está associada a presença de uma massa de ar seco sobre o continente denominado de Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que impede a formação/avanço de sistemas meteorológicos causadores de chuvas. De acordo com a climatologia, a partir de outubro essa massa de ar seco (ASAS) retorna para o oceano Atlântico e volta a ocorrer chuvas regulares na região (DE AZAMBUJA, 2018). Na parte norte da bacia os menores volumes de chuva são observados nos meses de julho a novembro (Figuras 9G a 9K), com o deslocamento regular da ZCIT para o Hemisfério Norte (REBOITA *et al.*, 2010, LINDENBERG e SILVA, 2016).

Figura 9 - Climatologia mensal da precipitação pluvial na BHX para período de 1981 a 2010.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Na parte sul e centro da bacia (Alto e Médio Xingu) os maiores volumes de chuva são observados no verão (Figuras 9L, 9A e 9B), com totais mensais de até 400 mm no mês. Os

volumes de precipitação pluvial observados neste período nesta região da BHX são oriundos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), outro importante sistema meteorológico que atua na América do Sul. A ZCAS se caracteriza por uma banda de nebulosidade e precipitação com orientação Noroeste-Sudeste, que se estende desde o sul e leste da Amazônia até o sudoeste do Oceano Atlântico Sul (CARVALHO *et al.*, 2004; SATYAMURTY *et al.*, 2010; QUADRO *et al.*, 2012). Há ocorrências da ZCAS a partir de outubro até abril, favorecendo volumes de chuvas maiores observados na parte sul e centro da BHX.

De modo geral, observa-se um regime diferenciado de precipitação pluvial entre as partes norte e sul da bacia. Na parte sul, os maiores volumes de chuva mensal ocorrem entre os meses de novembro a abril e os menores volumes ocorrem no trimestre junho, julho e agosto. Na parte norte, os maiores volumes de chuva são observados entre os meses de dezembro a maio e os menores volumes observados no trimestre agosto, setembro e outubro. A parte central da bacia, embora seja uma região de transição, no período chuvoso experimenta o mesmo regime de precipitação pluvial observado na parte sul da BHX.

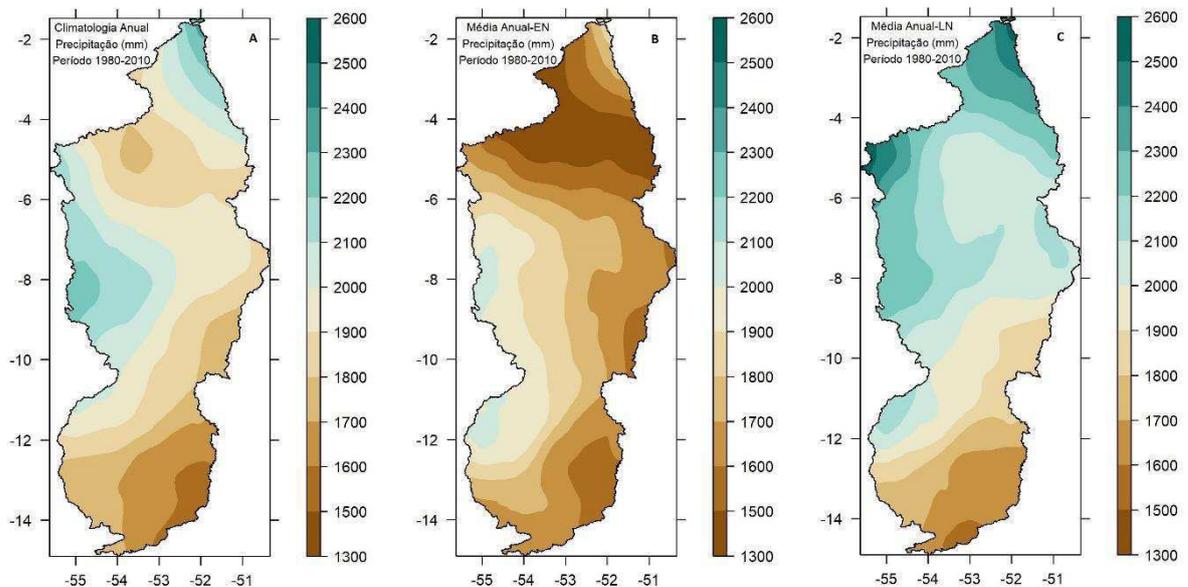
A partir da Figura 10 é exibida a distribuição espacial da precipitação pluvial anual na BHX. Primeiramente, na Figura 10A a precipitação pluvial média anual para o período de 1981 a 2010 em seguida na Figura 10B a precipitação pluvial média anual nos anos selecionados com eventos de El Niño (1983, 1987, 1992, 1997 e 1998), e na Figura 10C, a precipitação pluvial média anual nos anos selecionados com eventos de La Niña (1988, 1989, 2000, 2008 e 2010). Os anos de ocorrências e intensidades dos fenômenos El Niño e La Niña, estão disponibilizados no portal do Centro de Previsão e Estudos Climáticos (CPTEC, 2020).

Climatologicamente, os totais anuais de precipitação pluvial variam entre 1400 a 2400 mm ao longo da BHX (Figura 10A). Na parte norte (Baixo Xingu) e centro-oeste da bacia (Médio Xingu) são observados os maiores volumes com precipitação anual acima de 1800 mm, enquanto na parte Sul (Alto Xingu) os volumes de precipitação em média não ultrapassam 1800 mm por ano. Na parte centro-oeste ainda no Médio Xingu os volumes de precipitação variam entre 1800 a 2200 mm por ano. Os volumes anuais de precipitação pluvial significativamente maiores na parte norte da bacia, aumenta a disponibilidade hídrica na região do Baixo Xingu onde está instalado a usina hidrelétrica de Belo Monte.

Os volumes anuais de precipitação pluvial na BHX nos episódios de El Niño e La Niña são apresentados nas Figuras 10B e 10C respectivamente. Nas partes norte e centro-oeste são

observadas as maiores influências destes fenômenos na precipitação pluvial anual da bacia, com redução significativa do volume de chuva nos anos de ocorrência do fenômeno El Niño (Figura 10B) e aumento no volume de chuva em anos de ocorrência do fenômeno La Niña (Figura 10C).

Figura 10 - Climatologia anual da precipitação pluvial no período de 1981-2010 (A), precipitação pluvial anual em anos com evento de El Niño (B), e a precipitação pluvial anual em anos com evento de La Niña (C) na BHX.

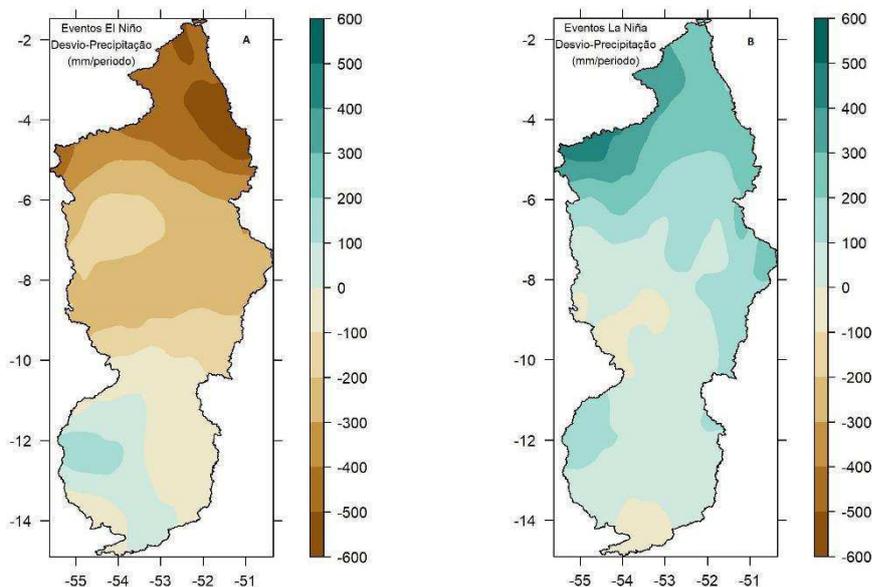


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os desvios de precipitação pluvial anual na BHX nos episódios de El Niño e La Niña são apresentados nas Figura 11A e 11B respectivamente. De acordo com a Figura 11A, nos anos de El Niño a BHX experimenta uma redução da precipitação pluvial anual na região central em direção a região norte da bacia, chegando até 600 mm em especial na parte norte da BHX (Figura 11A). Nos anos de La Niña esse comportamento se inverte, e a BHX experimenta um aumento da precipitação pluvial anual em praticamente toda bacia, podendo atingindo um acréscimo no acumulado anual até 500 mm na parte norte da BHX (Figura 11B).

Na região sul da BHX, observa-se redução no acumulado anual de precipitação pluvial de até 100 mm em anos de La Niña (Figura 11B). Essa redução também foi observada em algumas áreas dessa região em anos de El Niño (Figura 11A), este comportamento pode ser explicado principalmente pela influência desta fase do ENOS mais na porção norte da bacia, atuando na posição e intensidade da ZCIT.

Figura 11 - Desvio de precipitação pluvial anual nos anos com evento de El Niño (A), e em anos com evento de La Niña (B) na BHX.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

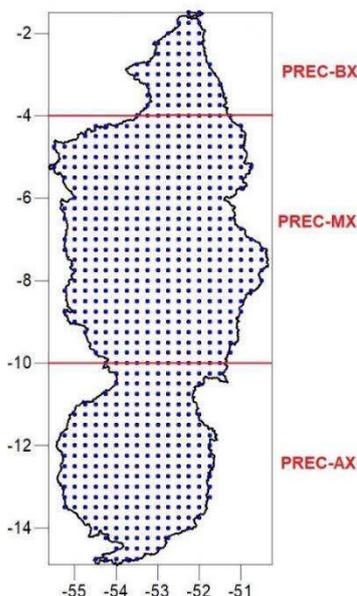
Alguns trabalhos descrevem a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no regime de chuva da Amazônia (DE SOUZA *et al.*, 2000, FERREIRA *et al.*, 2020). De acordo com FRANCO *et al.*, (2015), os anos de El Niño se associam com a manifestação de padrões de convecção tropical anormalmente enfraquecidos nas regiões de atuação da ZCIT e da ZCAS, que resultaram, conseqüentemente, na ocorrência de anomalias negativas de precipitação pluvial em grande parte da Amazônia, explicando, assim, o regime hidrológico predominantemente abaixo da média no rio Xingu em Altamira. Já para anos de La Niña, essa anomalia no padrão da convecção tropical nestas regiões se inverte, causando anomalias positivas de precipitação pluvial e o regime hidrológico observado predomina acima da média no Rio Xingu em Altamira.

Os resultados aqui encontrados corroboram com estudos anteriores sobre a distribuição espaço-temporal da precipitação pluvial na BHX, reforçando ainda as afirmações que na região ao norte da bacia (Baixo Xingu) a Zona de Convergência Intertropical atua como principal sistema meteorológico responsável pelas chuvas principalmente no verão e na região central e sul da bacia (Médio e Alto Xingu) as chuvas são predominantes da Zona de Convergência Atlântico Sul (DOS SANTOS *et al.*, 2016; SANTOS *et al.*, 2017; DE AZAMBUJA, 2018).

4.1.2 Tendência da Precipitação Pluvial

Utilizando os testes não paramétrico de Mann-Kendall e Pettitt foram avaliados tendências e pontos de mudanças nas séries sazonais e anuais de precipitação pluvial considerando os dados de XAVIER *et al.*, (2016) para o período de 1980 a 2016 nas três regiões da bacia (norte, centro e sul), que correspondem a precipitação no Baixo (PRP-BX), Médio (PRP-MX) e Alto Xingu (PRP-AX) respectivamente. Na Figura 12 são mostrados os pontos de dados “*grids*” utilizados na pesquisa e a delimitação das três regiões definidas na BHX.

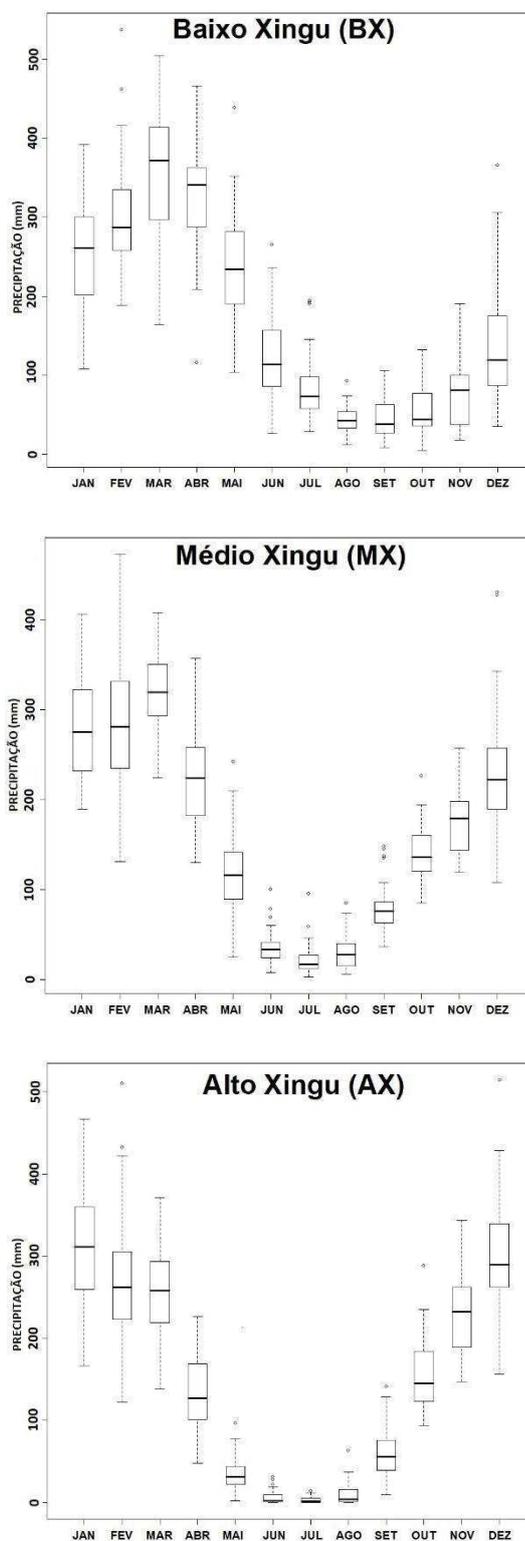
Figura 12 - Pontos de dados “*grids*” de precipitação pluvial na BHX nas regiões do Baixo, Médio e Alto Xingu, utilizados no trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A Figura 13 mostra os boxplots dos acumulados mensais de precipitação pluvial para cada região da BHX, considerando o período de 1980-2016. De modo geral, as Figuras 13A, 13B e 13C, retrataram bem o comportamento em relação à distribuição espacial mensal das chuvas nas três regiões analisadas conforme a Figura 9. No Baixo Xingu, a estação chuvosa vai de dezembro a maio e a estação seca de junho a novembro. O Médio Xingu e Alto Xingu, apresentam comportamento similar na distribuição mensal das chuvas, com a estação chuvosa em geral de novembro a abril e a estação seca de maio a outubro. Esses resultados reforçam a afirmação anterior que o regime de chuva na BHX apresenta duas estações bem definidas, uma estação chuvosa e uma estação seca. A maior variabilidade nos dados mensais de precipitação pluvial é observada durante a estação chuvosa nas três regiões da bacia.

Figura 13 - Boxplots dos valores mensais da precipitação pluvial nas três regiões da BHX no período de 1980-2016.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Informações estatísticas descritiva das séries de precipitação pluvial anual nas três regiões da BHX para o período de 1980-2016 são mostradas na Tabela 7. O total anual na parte norte (BX) ultrapassa 2000 mm, já na parte central (MX) e sul da bacia (AX) apresentam os valores de 1947 e 1788 mm respectivamente. Ainda, o BX mostrou o menor valor no mínimo e o maior valor no máximo de precipitação anual, comparado as outras regiões da bacia (MX e AX), com o volume anual de 1304 mm e 2621 mm respectivamente. Os resultados indicam maior variabilidade nos totais anuais de precipitação na parte norte da bacia (PREC-BX).

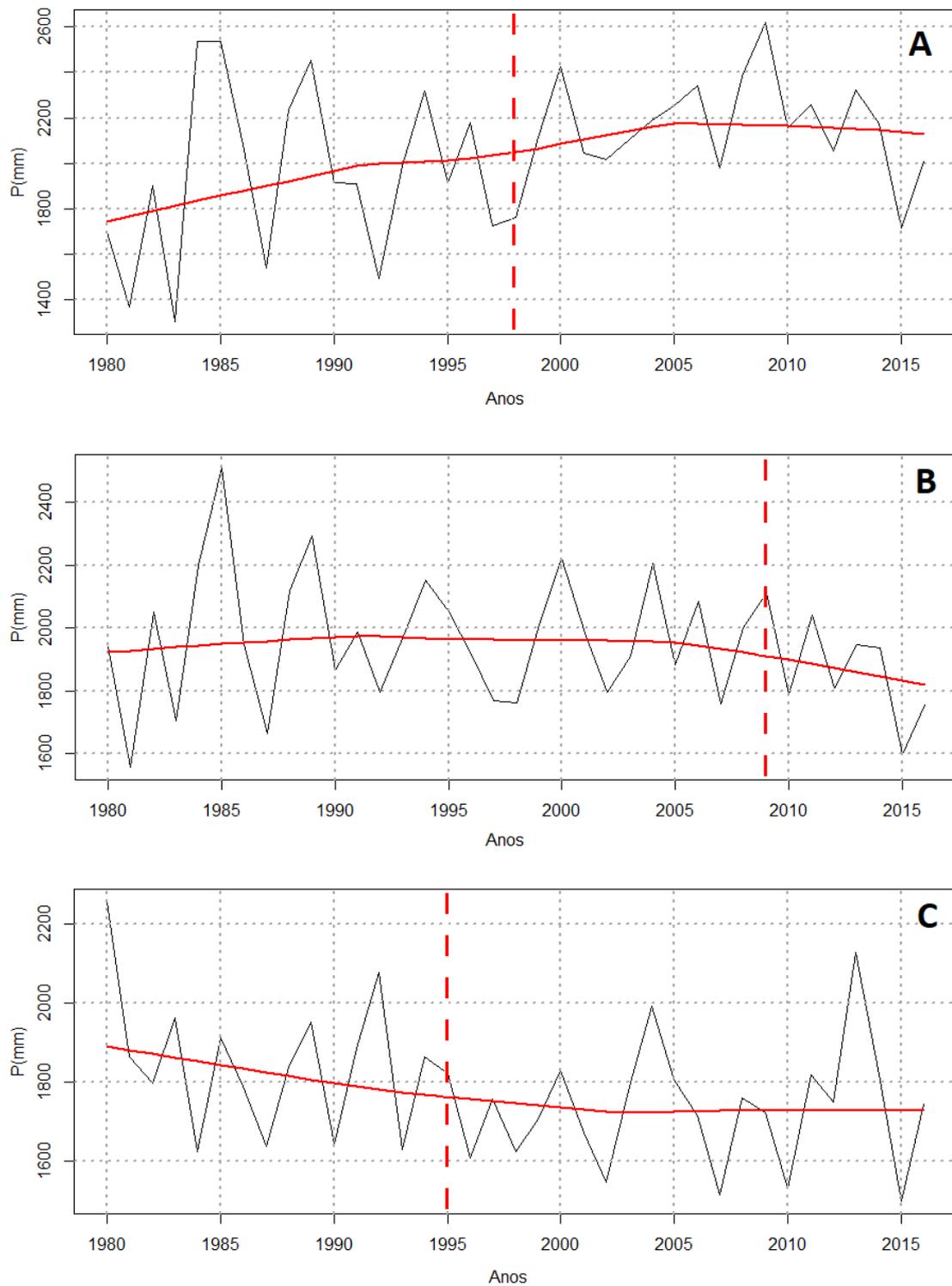
Tabela 7. Estatística descritiva da precipitação pluvial anual nas três regiões da BHX.

Parâmetro	PREC-BX (mm)	PREC-MX (mm)	PREC-AX (mm)
Mínimo	1304	1556	1498
1° Quartil	1911	1796	1642
Mediana	2081	1947	1788
Média	2055	1949	1780
3° Quartil	2259	2052	1863
Máxima	2621	2513	2257

Na Tabela 7 é observado uma amplitude menor na precipitação pluvial anual na parte sul da bacia (PREC-AX), onde os valores mínimo e máximo são de 1498 e 2257 mm respectivamente. Essa região passa por um período longo de estiagem com alguns meses do ano com volumes de precipitação abaixo de 50 mm no mês (maio a setembro), que contribui para apresentar os menores acumulados anuais de chuva na BHX. Outras informações são mostradas na Tabela 4, como: 1° Quartil, Mediana e 3° Quartil nas três regiões da na BHX.

A partir da Figura 14 são avaliados os totais anuais de precipitação pluvial, linhas de tendências e pontos de mudança nas três regiões da BHX para o período de 1980 a 2016. Aparentemente são observados pontos de mudança na precipitação pluvial anual nas três regiões da bacia, porém, de acordo com o teste de Pettitt realizado, os pontos identificados não possuem significância estatística (Tabela 5). Inicialmente são observadas tendências positiva de precipitação pluvial na parte norte (BX) e negativa na parte sul (AX) da bacia, esse padrão se estabiliza após os pontos de mudança identificados (Figuras 14A e 14C). Na região central da bacia (MX) é observada uma tendência negativa com diminuição da precipitação pluvial anual somente a partir do ponto de mudança (Figura 14B).

Figura 14 - Totais anuais de precipitação pluvial e linhas de tendências, nas regiões do Baixo Xingu (A) Médio Xingu (B), Alto Xingu (C), para o período de 1980-2016.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O teste de Mann-Kendell foi aplicado para avaliar tendências nas séries de precipitação pluvial trimestrais e anual nas três regiões da BHX. As características e resultados dos testes nas séries avaliadas são mostrados na Tabela 8. Em escala anual, os resultados mostram tendências positivas de aumento da precipitação na parte norte (PREC-BX), conforme pode ser observado no valor Tau Kendell positivo, com confiança estatística o nível de 90%, apresentando o p valor de 0,06. Já nas partes central e sul da bacia os resultados mostram tendências negativas, com os valores Tau Kendall negativos, contudo, somente na parte sul da bacia (PREC-AX) a tendência de diminuição de precipitação foi estatisticamente significativa ao nível de 95%, apresentando o p valor de 0,05. Os resultados na avaliação das séries anuais podem não representar corretamente a realidade da evolução nas tendências da precipitação pluvial nas últimas décadas na BHX, assim, foi necessário avaliar as séries em escala sazonal, nos trimestres de dezembro, janeiro e fevereiro (DJF), março abril e maio (MMA), junho, julho e agosto (JJA) e setembro, outubro e novembro (SON).

Tabela 8. Características e resultados do teste de Mann-Kendall nas três regiões da BHX.

Regiões	PREC-BX		PREC-MX		PREC-AX	
Período	Tau	p valor	Tau	p valor	Tau	p valor
DJF	0,068	0,565	-0,232	0,045*	-0,083	0,479
MAM	0,281	0,015*	0,077	0,513	-0,047	0,695
JJA	0,042	0,724	-0,080	0,496	-0,111	0,346
SON	0,084	0,472	-0,070	0,547	-0,105	0,366
Anual	0,213	0,065**	-0,114	0,326	-0,223	0,054*

Nível de confiança: *95%; **90%.

O teste de Pettitt identificou possíveis pontos de mudanças nas séries de precipitação pluvial trimestrais e anual nas três regiões da BHX, conforme mostra a Tabela 9. Na avaliação anual, foi identificado ponto de mudança no ano de 1998 no Baixo Xingu, 2009 no Médio Xingu e 1995 no Alto Xingu, porém, sem significância estatística em nenhuma das regiões. Na avaliação trimestral, todos os pontos de mudanças identificados não apresentaram significância estatística nas regiões avaliadas. Os resultados apontam que embora exista um patamar de mudança nas séries trimestrais e anual, os dados continuam homogêneo é a tendência encontrada é devido uma variabilidade natural normal, intrínseca a própria natureza dos dados nas séries de precipitação pluvial.

Tabela 9. Características e resultados do teste de Pettitt nas três regiões da BHX.

Regiões	PRP-BX		PRP-MX		PRP-AX	
	Período	K / Ano	p valor	K / Ano	p valor	K / Ano
DJF	20/1999	0,661	16/1995	0,380	16/1995	0,561
MAM	14/1993	0,080	4/1983	0,631	18/1997	0,311
JJA	4/1983	0,631	15/1994	0,496	18/1997	0,346
SON	4/1983	0,706	22/2001	0,999	8/1987	0,999
Anual	19/1998	0,183	30/2009	0,869	16/1995	0,125

* Nível de confiança 95%, K = ponto de mudança.

No trimestre DJF foi observado tendência negativa de precipitação pluvial na parte central da bacia (PRP-MX), conforme pode ser visto no valor Tau Kendall de -0,23, com confiança estatística no nível de confiança de 95%, apresentando o p valor de 0,04; indicando uma redução no volume de chuva no trimestre nesta parte da bacia. As tendências positivas e negativas encontradas nas partes norte e sul da BHX, não foram estatisticamente significantes, com o p valor de 0,56 e 0,47 respectivamente.

No trimestre MAM foi observado tendência positiva de precipitação pluvial na parte norte da bacia (PRP-BX), conforme pode ser visto no valor Tau Kendall de 0,29; com significância estatística no nível de confiança de 95%, apresentando o p valor de 0,01; indicando um aumento no volume de chuva no trimestre nesta parte da bacia. Nos meses de março e abril são observados os maiores volumes de precipitação pluvial nessa região, associados com forte atuação da ZCIT. As tendências positivas encontradas em MAM nas partes central e sul da BHX, não foram estatisticamente significantes, com o p valor de 0,51 e 0,69 respectivamente.

Nos trimestres JJA e SON, períodos com os menores volumes de precipitação pluvial observados na BHX, embora tenham apresentados tendências positivas na parte norte e tendências negativas nas partes central e sul da bacia respectivamente, as tendências encontradas não possuem significância estatística em nenhuma das regiões. Em geral, o trimestre JJA representa o período mais seco na BHX principalmente na parte sul da BHX, com valores de precipitação pluvial mensal abaixo de 50 mm.

De maneira geral, as partes norte e sul da bacia apresentaram tendências positivas e negativas respectivamente em todos os trimestres avaliados, contudo, foram observadas tendências com significância estatística ao nível de confiança de 95% nas séries trimestrais de

chuva somente no trimestre DJF na parte central da bacia indicando uma redução no volume de chuva (tendência negativa) e no trimestre MAM na parte norte da bacia, indicando um aumento no volume de chuva (tendência positiva).

A bacia amazônica vem experimentando eventos extremos de secas/estiagens, destacando os fortes eventos ocorridas nos anos de 2005, 2010 e 2015 (MARENGO e ESPINOZA, 2016; JIMENEZ *et al.*, 2018). Trabalhos apontam uma redução significativa no transporte de umidade na bacia Amazônica em 2005, em função do aquecimento anômalo do Oceano Atlântico Tropical Norte (MARENGO *et al.*, 2008). Os eventos de secas ocorridos em 2010 e 2015 estão associados ao fenômeno El Niño e o aquecimento do oceano Atlântico Tropical Norte (JIMÉNEZ-MUÑOZ *et al.*, 2016; PANISSET *et al.*, 2018). Esses fortes eventos de secas ocorridos a partir de 2005, podem justificar o ponto de mudança identificando nas linhas de tendências da precipitação pluvial, especialmente na parte central da BHX

Alguns trabalhos têm demonstrado uma tendência de encurtamento / deslocamento / diminuição da intensidade do período de maior atuação da ZCAS, principal fenômeno causador das chuvas nas porções sul e central da BHX (CARVALHO *et al.*, 2004; DE SOUZA *et al.*, 2005; GRIMM 2011; QUADRO *et al.*, 2012; SANTOS *et al.*, 2017). Este fato pode ser responsável pela tendência de diminuição na precipitação pluvial em especial na região do Alto Xingu, verificado aqui nesta pesquisa.

O monitoramento de dados hidrometeorológicos (principalmente chuva e vazão) são de fundamental importância para auxiliar no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Contudo, nem sempre esses dados estão disponíveis por longos períodos e com boa qualidade, principalmente em países em desenvolvimento com grandes áreas continentais como o Brasil, China e África (OYEBANDE, 2001 e DUAN *et al.*, 2010).

Mesmo com a baixa densidade de estações pluviométricas em algumas regiões do mundo como na Amazônia brasileira, a disponibilidade de dados em pontos de grade com alta resolução, como os dados utilizados neste trabalho é uma alternativa confiável, permitindo identificar padrões climáticos e tendências estatisticamente significativas no comportamento da precipitação pluvial nas últimas décadas na BHX.

4.2 ÍNDICES DE EXTREMOS CLIMÁTICOS

A partir da Figura 15, são avaliados os coeficientes de tendência dos índices extremos climáticos de precipitação na BHX para o período de 1980-2016. Os pontos pretos na figura destacam as séries temporais cujos índices foram estatisticamente significativos ao nível de confiança de 95%, com valor de $p < 0,05$. A Tabela 10 apresenta o resumo dos pontos de grade com tendência significativa e não significativa ao nível de confiança de 95% para cada índice extremo de precipitação avaliado.

Tabela 10. Índices climáticos de precipitação e número de pontos de grade com tendências não significativas (NS) e significativas (S) ao nível de 5% na BHX, bem como a porcentagem dos valores significativos (S).

Índice	Não significativos-NS	Significativos-S	(%) Significativos-S
RX1day	634	68	9,7
RX5day	555	147	20,9
R1	571	185	26,3
R10	526	176	25,1
R20	506	196	27,9
SDII	508	194	27,6
CDD	545	157	22,5
CWD	629	73	10,4
R95p	482	220	31,3
R99p	557	145	20,6
PRCPTOT	510	192	27,3

Os sinais das tendências nos índices extremos de precipitação não são homogêneos em toda a BHX. A maioria das tendências observadas na análise não é estatisticamente significativa (Tabela 10). Isso é especialmente válido para os índices RX1day e CWD, que apresentaram significância para apenas 9,7% e 10,4% dos pontos respectivamente. Trabalhos anteriores (CARVALHO *et al.*, 2004; DE SOUZA *et al.*, 2005; GRIMM, 2001; QUADRO *et al.*, 2012; VIEIRA *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2017) mostraram uma tendência de encurtamento / deslocamento / diminuição da intensidade durante o período de maior atividade do SCAS, principal fenômeno atmosférico que causa chuvas nas porções central e sul do BHX.

As tendências dos índices climáticos Rx1day e Rx5day (Figuras 15a e 15b) mostram os mesmos comportamentos, mas com intensidades diferentes. Existem tendências positivas da latitude 5° S em direção ao norte e nas áreas central e sudoeste da BHX; e tendências negativas entre 5° S e 8° S, bem como na direção NW-SE entre as latitudes de 10° S e 13° S. As áreas com tendências positivas no índice Rx1day não são estatisticamente significativas, enquanto, para o índice Rx5day, nas mesmas áreas, as tendências são mais fortes e com maior número de pontos significativos.

O número de dias no ano com precipitação acima de 1,0 mm e 10 mm (Figuras 15c e 15d, respectivamente) vem diminuindo consideravelmente nas partes central e sul da BHX (Médio e Alto Xingu), onde esses índices apresentam tendência negativa de até 10 dias / período. Um comportamento inverso foi observado na parte norte da bacia (Baixo Xingu), onde os índices apresentam tendências positivas iguais ou superiores a 10 dias / período.

O índice climático R20mm (Figura 15e) mostra um comportamento semelhante aos índices Rx1day e Rx5day abordados acima, indicando tendências positivas e negativas que podem ser superiores a 6 dias / período de chuva acima de 20 mm. O mesmo padrão espacial de tendências positivas e negativas observadas para esses três índices também é notado para o índice SDII (Figura 15f).

O padrão espacial do índice CDD (Figura 15g) indica uma tendência geral positiva no número de dias secos consecutivos, mais notadamente nas partes central e sul da BHX (Médio e Alto Xingu). Para o índice climático CWD (Figura 15h), tendências positivas significativas são observadas principalmente na parte norte da bacia (Baixo Xingu), indicando um aumento na sequência de dias consecutivos com precipitação acima de 1,0 mm para aquela região específica.

O comportamento dos dias muito úmidos e extremamente úmidos avaliados nos índices R95p e R99p (Figuras 15i e 15j) apresentaram as mesmas tendências na BHX, também muito similares aos índices Rx1day e Rx5day, com uma grande variação espacial ao longo da bacia, alternando áreas de tendências positivas de R95p e R99p no norte e leste, com situação oposta observada na área central e oeste da BHX. Esse comportamento similar também foi observado para os dias do ano com precipitação acima de 20 mm, principalmente na região ao norte da BHX.

Normalmente, tendências opostas são esperadas para CDD e CWD, e isso é observado de forma mais precisa em uma região que compreende a porção centro-leste do Médio Xingu (entre as latitudes 6° S e 10° S e longitudes 53° W e 51° W), em que as tendências são positivas para CDD e negativas para CWD. Esse comportamento típico também ocorre no Baixo Xingu, com tendências ligeiramente negativas para CDD e tendências positivas significativas para CWD. Porém, tendências de mesmo sinal para ambos os índices são encontradas para pontos específicos no Alto e Médio Xingu, onde as tendências de CDD e CWD são positivas. Achados semelhantes são relatados por OLIVEIRA *et al.*, (2017) e COSTA *et al.*, (2020) ao estudar o Nordeste do Brasil. Esses autores ponderam que tais resultados sugerem uma intensificação da sazonalidade nessas áreas específicas, com as estações secas tornando-se mais secas e as estações chuvadas mais úmidas.

O comportamento de dias muito úmidos e extremamente úmidos, avaliado pelos índices R95p e R99p (Figuras 15i e 15j), apresenta o mesmo padrão espacial das tendências dos demais índices de chuva na BHX. Particularmente semelhantes aos índices Rx1day e Rx5day, com grande variação espacial ao longo da bacia, alternando áreas de tendências positivas nas regiões norte, sul e leste, sendo observada situação oposta nas áreas central e oeste do BHX. Outro exemplo de semelhança com esses índices é o que diz respeito aos dias do ano com precipitação acima de 20 mm (Figura 15e), principalmente na região norte da BHX (Baixo Xingu).

Um índice adicional importante a ser analisado é aquele que mostra a tendência da precipitação total anual em dias úmidos e compila, em certa medida, várias características dos índices de precipitação analisados anteriormente, o PRCPTOT (Figura 15k). Seu padrão espacial aponta para tendências positivas significativas na região norte da BHX (Baixo Xingu) e tendências negativas nas regiões central e sul (Médio e Alto Xingu). As tendências de precipitação encontradas no Índice PRCPOT para a BHX também concordam com outros índices (como Rx5dia, R1mm, R10mm, R20mm, SDII, R95p e R99p).

Trabalhos anteriores sobre tendências de chuva mostram resultados diferentes, mas todos concordam que os índices de chuva geralmente não mostram tendências estatisticamente significativas (DOS SANTOS E OLIVEIRA, 2017; DA SILVA *et al.*, 2018b; DA SILVA *et al.*, 2019). DA SILVA *et al.*, (2018a) encontraram tendências estatisticamente significativas ao nível de 5% apenas para os índices SDII, R10mm e CWD e para um único ponto localizado da BHX. Para os índices R10mm, R20mm, RX1Day, RX5Day, CDD, R95p, R99p e PRCPTOT,

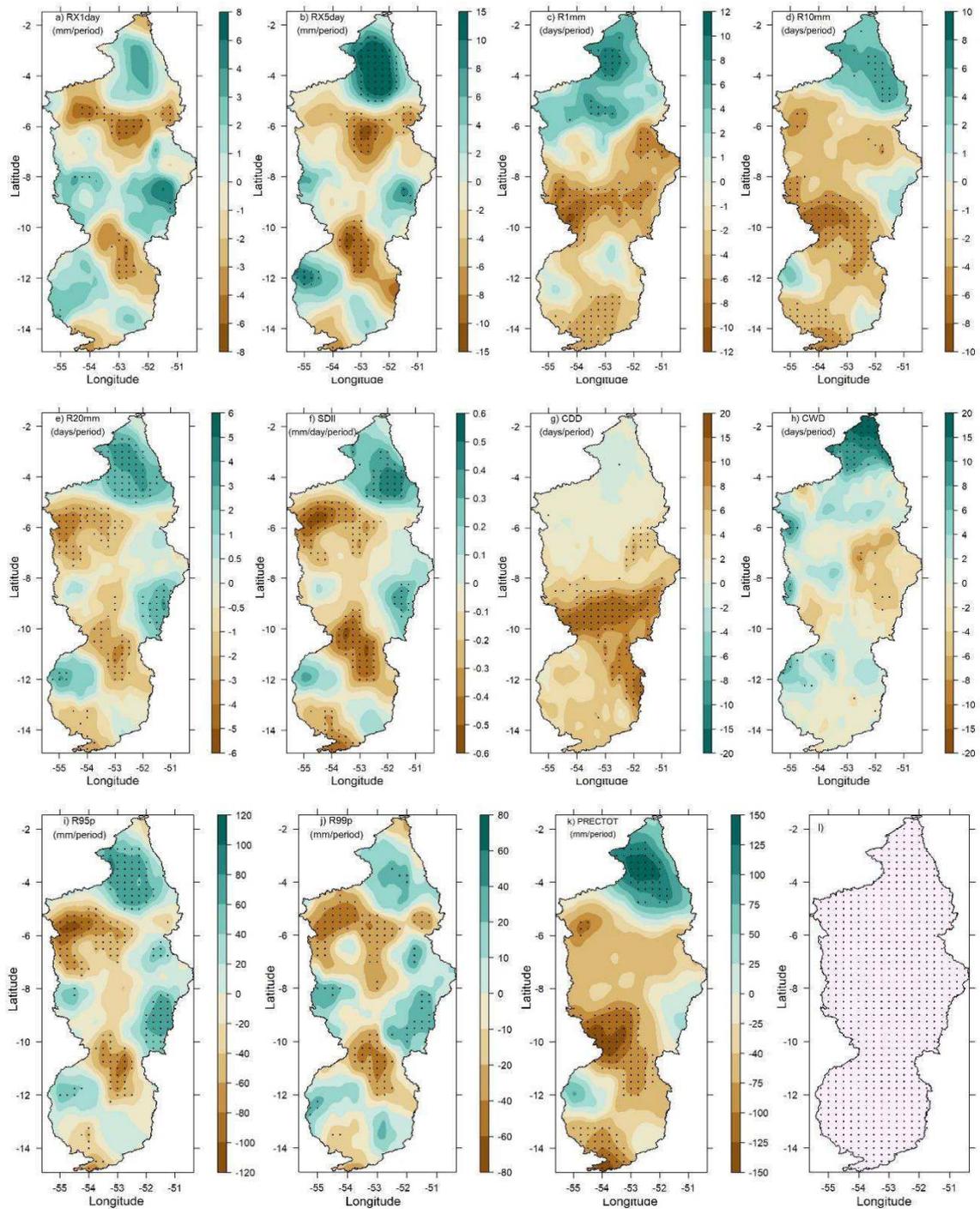
as tendências encontradas não foram estatisticamente significativas. De acordo com estes resultados, o ponto analisado por DA SILVA *et al.* (2018a) está localizado em uma área de transição entre a porção norte da bacia, com uma tendência úmida indicada pela maioria dos índices, e a porção central da bacia, onde há prevalência de uma tendência seca apontada pelos índices. Os resultados obtidos nesta pesquisa mostram a variabilidade dos índices para toda a área da BHX.

A combinação de processos físicos e dinâmicos de grande escala, bem como sistemas locais, como as linhas de instabilidade que avançam da costa ao interior da Amazônia (COHEN *et al.*, 1995; ALCÂNTARA *et al.*, 2011), contribuem para a heterogeneidade espaço-temporal dos eventos extremos de precipitação e da precipitação total anual, caracterizada pelo índice PRCPTOT (SANTOS *et al.*, 2015). Mecanismos de interação oceano-atmosfera, como o ENOS e o Gradiente Meridional de Temperatura da Superfície do Mar Inter-hemisférico, também conhecido como Dipolo do Atlântico, causam impactos recorrentes na Amazônia, como secas e inundações, influenciando extremos de precipitação (LIEBMANN e MARENGO, 2001; MARENGO, 2008; SATHLER *et al.*, 2010; XU *et al.*, 2011; TOMASELLA *et al.*, 2011; MARENGO *et al.*, 2013; LLOPART *et al.*, 2014; MARENGO E ESPINOZA, 2016; MARENGO *et al.*, 2018).

Particularmente no que diz respeito às chuvas, a variação espaço-temporal dos extremos está relacionada aos sistemas de convecção de grande escala e escala sinótica, tais como: a ITCZ, que é responsável pela precipitação máxima durante o outono austral (DE SOUZA e ROCHA, 2006); a SACZ, que afeta principalmente o sul e sudoeste da Amazônia, sendo responsável pela maior parte das chuvas do final da primavera ao final do verão (CARVALHO *et al.*, 2004; GRIMM, 2011); e a Alta da Bolívia, que favorece a parte nordeste (ROLIM *et al.*, 2006) que está associado a eventos de chuvas de verão (LENTERS e COOK, 1997).

A precipitação é a variável meteorológica que mais influencia a vazão, portanto, mudanças nos padrões de chuvas podem afetar as atividades socioeconômicas da região, como agricultura e geração de energia. No entanto, esses impactos também variam de acordo com outras características da bacia, como tipo de vegetação, uso e cobertura do solo (COE *et al.*, 2009; DIAS *et al.*, 2018). VILLAR *et al.*, (2009) mostraram que mudanças extremas nas vazões dos rios na bacia Amazônica estão associadas à variabilidade regional da precipitação e da circulação atmosférica, bem como, aos indicadores climáticos tropicais de grande escala.

Figura 15 - Distribuição espacial das tendências dos índices de extremos climáticos de precipitação na BHX de 1980 a 2016: RX1day (a), RX5day (b), R1mm (c), R10mm (d), R20mm (e), SDII (f), CDD (g), CWD (h), R95p (i), R99p (j), PRECTOT (k). Os pontos de grades usados na BHX para elaboração dos índices de precipitação são mostrados no ultimo mapa (l). *Intervalo de confiança usado 95%.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3 SIMULAÇÕES DAS VAZÕES MENSAIS

No intuito de validar a técnica de regressão por componentes principais na previsibilidade de vazões mensais na BHX, foram realizadas simulações de vazões médias nas estações fluviométricas selecionadas (ANEXO - Tabela A2). O modelo empírico foi aplicado com a variável preditora de precipitação pluvial mensal com os dados gradeados disponibilizados por XAVIER *et al.*, (2016). Essa base de dados “*grids*” vem sendo amplamente utilizada no Brasil como fonte de informações meteorológicas para pesquisas diversas (DA SILVA *et al.*, 2019; PAREDES-TREJO *et al.*, 2019, DOS REIS *et al.*, 2020).

Foi utilizado o período de 1981-2010 na etapa de treinamento/calibração do modelo chuva-vazão baseado na técnica de PCR para simulações das vazões médias mensais na BHX. Comparações entre as vazões mensais simuladas e as respectivas vazões observadas foram realizadas e calculado o coeficiente de correlação, considerando cada mês e estação fluviométrica separadamente. O coeficiente de correlação pode variar de 0 a 1, quando o valor se aproxima de 1 representa boa correlação entre o valor observado e o simulado, o inverso acontece quando o valor se aproxima de 0 (WILKS, 2006).

Nesta etapa de treinamento, as vazões mensais na BHX foram simuladas com a precipitação pluvial do mês atual e defasada de 1 a 3 meses, representadas por $t(0)$, $(t-1)$, $(t-2)$ e $t(t-3)$, respectivamente. Esse procedimento foi realizado para obter entendimento intuitivo sobre o grau de relação entre a chuva e vazão na BHX e para identificar o número apropriado de valores antecedentes de precipitação pluvial como entrada no modelo chuva-vazão para simulação da vazão mensal nas estações fluviométricas da bacia.

A confiabilidade das correlações entre as vazões simuladas e observadas foi obtida através do teste t-student. Para amostra de dados de vazões utilizados e um nível de confiabilidade de 95% ($p < 0,05$), foi definido o valor crítico do coeficiente de correção igual a 0,35. Ou seja, os resultados indicam que todas as correlações entre as vazões simuladas e observadas acima de 0,35 possuem significância estatística ao nível de confiança de 95%.

Os resultados nas análises das correlações no período de treinamento mostram que os melhores desempenhos nas simulações das vazões médias mensais foram obtidos com a precipitação pluvial defasada no tempo $t(0)$ e $(t-1)$, os valores dos coeficientes de correlação encontrados nesta etapa são mostrados na Tabela 11. Se destacaram nas simulações das vazões mensais as estações fluviométricas de Pousada Matrinxa no tempo $t(0)$ e Altamira $(t-1)$, com

os valores do coeficiente de correlação de 0,75 e 0,71 respectivamente. As simulações de vazões mensais com defasagens maiores na precipitação pluvial (t - 2) e (t - 3), apresentaram resultados menos satisfatórios em comparação as defasagens anteriores em todas as estações da BHX.

Tabela 11. Coeficientes de correlação entre as vazões simuladas e observadas no período de treinamento nas estações da BHX.

Estação	Rio	Área (km²)	t (0)	(t - 1)	(t - 2)	(t - 3)
Altamira*	Xingu	448.000	0,59	0,71	0,57	0,55
Pedra do Ó	Irirí	122.000	0,60	0,70	0,56	0,53
Cajueiro	Curuá	35.600	0,57	0,66	0,47	0,42
Boa Esperança	Fresco	42.400	0,62	0,66	0,50	0,52
Jusante Rio Preto	Comandante Fontoura	12.000	0,54	0,64	0,53	0,50
Consul	Van den Steinen	8.900	0,52	0,49	0,43	0,47
Fazenda Iguaçú	Rio Ronuro	3.840	0,61	0,54	0,44	0,43
Pousada Matrinxa	Culuene	11.600	0,75	0,50	0,49	0,42

* *Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.*

Conforme os resultados mostrados na Tabela 11, fica evidente que nas estações fluviométricas da BHX com maiores áreas de drenagem (Altamira, Pedra do Ó, Cajueiro, Boa Esperança e Jusante do Rio Preto) a vazão mensal em um determinado mês (t), está mais relacionada com as chuvas do mês anterior (t - 1) nas simulações realizadas. Estes resultados indicam que a contribuição da precipitação pluvial nestas localidades da BHX demora no máximo um mês para contribuir com a vazão mensal.

Já nas estações fluviométricas da BHX com área de drenagem menores, abaixo de 12.000 km² (Consul, Fazenda Iguaçú e Pousada Matrinxa), a vazão mensal em um determinado mês (t) está mais relacionada com as chuvas do mesmo mês, ou seja, sem defasagem t (0) nas simulações do modelo, nestes casos, os resultados demonstram que a contribuição da precipitação pluvial na vazão mensal ocorre dentro do mesmo mês. Estes resultados corroboram com metodologia similar adotada em outras bacias estudadas (BRAVO *et al.*, 2012 e MALFATTI *et al.*, 2018).

De acordo com o resultado do desempenho individual de cada estação fluviométrica na simulação das vazões mensais com a precipitação pluvial defasada no tempo $t(0)$ e $(t - 1)$, os coeficientes de correlação para todos os meses são mostrados na Tabela 12. De maneira geral, a técnica aplicada conseguiu simular bem a vazão com base na precipitação pluvial em praticamente todos os meses do ano nas estações fluviométricas analisadas, contudo, algumas estações e meses se destacaram no período de treinamento/calibração. Destaca-se positivamente os resultados encontrados nas estações de Altamira e Pousada Matrinxa onde os valores do coeficiente de correlação foram superiores a 0,50 em todos os meses do ano, indicando uma correlação de moderada a forte na simulação da vazão média mensal nestas localidades.

Tabela 12. Coeficientes de correlação mensais entre as vazões simuladas e observadas nas estações fluviométricas na BHX, no período de treinamento/calibração.

ESTAÇÃO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Altamira	0,84	0,70	0,75	0,75	0,91	0,82	0,60	0,56	0,66	0,53	0,75	0,70
Pedra do Ó	0,89	0,71	0,74	0,67	0,83	0,81	0,66	0,48	0,81	0,36	0,75	0,73
Cajueiro	0,60	0,68	0,87	0,68	0,86	0,67	0,65	0,46	0,73	0,23*	0,76	0,76
Boa Esperança	0,58	0,75	0,49	0,72	0,78	0,85	0,79	0,51	0,67	0,41	0,55	0,77
Jusante do Rio Preto	0,61	0,58	0,81	0,55	0,57	0,69	0,57	0,49	0,78	0,71	0,57	0,75
Consul	0,40	0,63	0,51	0,49	0,40	0,54	0,61	0,60	0,32*	0,70	0,41	0,63
Fazenda Iguaçu	0,68	0,57	0,78	0,60	0,73	0,41	0,57	0,59	0,49	0,77	0,64	0,49
Pousada Matrinxa	0,73	0,79	0,86	0,61	0,78	0,78	0,56	0,84	0,69	0,84	0,90	0,67

* *Sem significância estatística ao nível de confiança de 95% pelo teste t-student.*

Destaca-se ainda na avaliação mensal mostrada na tabela acima, os resultados encontrados nos meses de fevereiro e julho, onde em todas as estações fluviométricas da BHX foram observadas correlações moderadas a fortes entre as vazões simuladas e observadas, com valores superiores a 0,50. Valores máximos nos coeficientes de correlação, iguais a 0,91 e 0,90 foram observados nas estações de Altamira e Pousada Matrinxa nos meses maio e novembro respectivamente, indicando uma correlação muito forte nestes meses entre as vazões simuladas e observadas.

Em alguns meses os resultados apresentaram uma correlação fraca sem significância estatística ao nível de confiabilidade de 95% nas simulações das vazões na BHX, na estação de Cajueiro (outubro) e Consul (setembro) onde o coeficiente de correlação apresentou valores de 0,23 e 0,32 respectivamente. Em geral, o trimestre agosto/setembro/outubro (período de estiagem), mostrou o pior desempenho nas simulações das vazões mensais durante o período de treinamento/calibração (exceto na estação fluviométrica Pousada Matrinxa). Ainda é possível identificar que a estação fluviométrica de Consul apresentou valores no coeficiente de correlação $\leq 0,70$ em todos os meses do ano, indicando uma correlação moderada entre as vazões simuladas e observadas, com valores abaixo 0,5 em alguns meses.

Para apoiar a análise dos resultados, informações descritivas das vazões mensais para o período de 1981-2010 nas estações fluviométricas da BHX são apresentadas na Tabela 13. A estação de Altamira concentra as contribuições de vazões de todas os demais rios na BHX, onde são observados os maiores volumes de vazões mensais com média anual de $8114 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. Nas estações Consul e Fazenda Iguaçu são observados os menores volumes de vazões com média anual de 116 e $81 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ respectivamente.

Tabela 13. Informações descritivas das series de vazões mensais para o período de 1981-2010 nas estações fluviométricas da BHX.

Estação	Rio	Mínima (m^3/s)	Média (m^3/s)	Máxima (m^3/s)
Altamira*	Xingu	770	8114	29088
Pedra do Ó	Iriri	65	2421	9883
Cajueiro	Curuá	36	805	3354
Boa Esperança	Fresco	40	895	3851
Jusante do Rio Preto	Comandante Fontoura	16	210	707
Consul	Van den Steinen	51	116	233
Fazenda Iguaçu	Rio Ronuro	37	81	223
Pousada Matrinxa	Culuene	35	264	1514

* Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

Na Tabela 14 são apresentadas as métricas estatísticas selecionadas para avaliar o desempenho da simulação das vazões mensais no período de verificação entre 2011-2016 nas

estações fluviométricas da BHX. Nesta etapa, foram avaliados o Coeficiente de Correlação (CC), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CN), *VIES* e a Raiz do Erro Quadrático Médio (*REQM*). O modelo conseguiu representar bem as vazões mensais observadas nas estações selecionadas neste período. O coeficiente de correlação ficou acima de 0,80 e o Coeficiente de Nash-Sutcliffe acima de 0,59 em todas as estações avaliadas, indicando uma correlação de moderada a forte entre as vazões simuladas e observadas na BHX.

Tabela 14. Métricas estatísticas entre as vazões mensais simuladas e observadas no período de validação nas estações fluviométricas da BHX.

ESTAÇÃO	RIO	PERÍODO	CC	CN	VIES	REQM
Altamira*	Xingu	2011-2014	0,95	0,90	-343	2352
Pedra do Ó	Iriri	2011-2014	0,93	0,84	-317	1001
Cajueiro	Curuá	2011-2016	0,84	0,68	-93	301
Boa Esperança	Fresco	2011-2016	0,85	0,70	-176	484
Jusante do Rio Preto	Comandante Fontoura	2011-2014	0,96	0,83	-46	76
Consul	Van den Steinen	2011-2014	0,95	0,70	-20	26
Fazenda Iguaçu	Rio Ronuro	2011-2016	0,80	0,59	-1	12
Pousada Matrinxa	Culuene	2011-2016	0,87	0,74	49	111

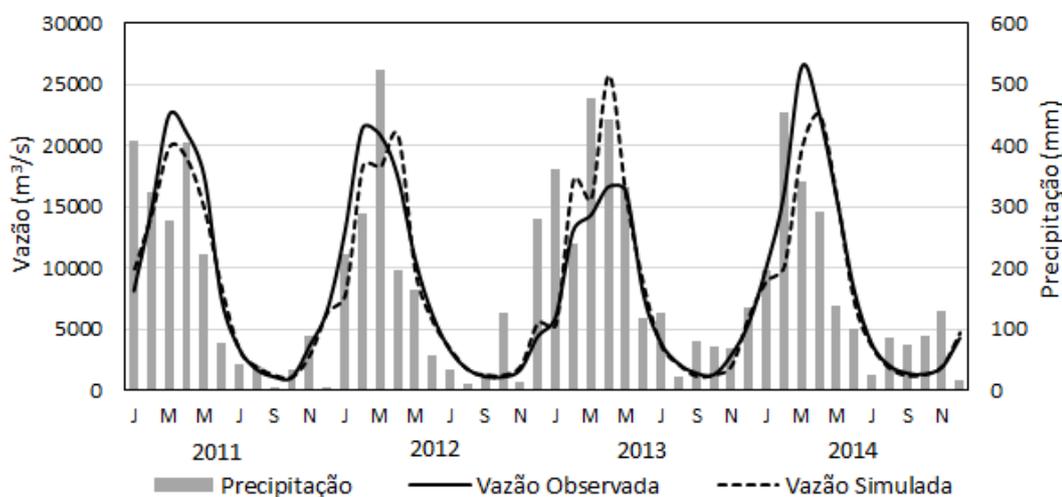
* Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

Uma métrica importante avaliada o *VIES*, apresentou valores negativos nas simulações no período de verificação, apontando para uma subestimativa discreta do modelo, exceto na estação fluviométrica Pousada Matrinxa, onde o *VIES* foi positivo igual a $49 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, indicando superestimativa discreta na simulação das vazões mensais nesta estação (Tabela 14). A *REQM* apresentou valores baixos em relação ao volume de vazão mensal observado em cada estação da BHX. Destaca-se na Tabela 14 os menores valores da *REQM*, de 12 e $26 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, nas estações Fazenda Iguaçu e Consul respectivamente.

Na Figura 16 estão as vazões mensais simuladas e observadas na estação fluviométrica em Altamira no período de validação. De maneira geral, o modelo conseguiu simular muito bem as vazões médias mensais, principalmente nos meses de estiagem (junho a novembro). Nos meses de fevereiro, março e abril, onde ocorre os eventos de cheia, o modelo conseguiu capturar

o mês com a vazão máxima observada em praticamente todo o período, exceto no ano de 2014. Na maioria dos meses no período de cheia, houve uma subestimativa discreta do modelo, com exceção no mês de abril de 2013, onde o modelo superestimou a vazão mensal observada em função da precipitação acumulada. Modelos hidrológicos devem ser aplicados e avaliados com cautela no período chuvoso, onde ocorrem os eventos extremos de precipitação e consequentemente vazões de pico (LUCAS *et al.*, 2009).

Figura 16 - Precipitação pluvial mensal observada e vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira, período de 2011-2014 (validação).



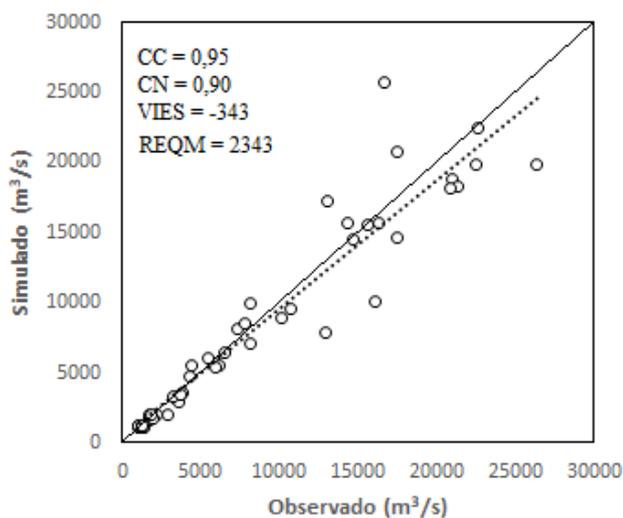
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O grau de relação entre chuva e vazão nos meses de pico (cheia e estiagem) na estação fluviométrica de referência em Altamira ficou demonstrado na Figura 16. Devido ao ciclo sazonal da chuva na Amazônia os rios apresentam os seus níveis mais altos poucos meses após as chuvas mais intensas. Consequentemente, na Amazônia períodos de seca meteorológica com poucas chuvas na estação chuvosa, são seguidos por períodos de seca hidrológica, com níveis baixos dos rios na estação de cheia (MARENGO e ESPINOSA, 2016).

De acordo com o gráfico de dispersão entre as vazões médias mensais simuladas e observadas na estação fluviométrica de Altamira no período de validação (Figura 17), os resultados foram considerados satisfatórios, com os valores dos indicadores de desempenho selecionados de coeficiente de correlação igual a 0,96 e o coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 0,90. De acordo com a literatura, os resultados encontrados nestes indicadores apontam para uma correlação muito forte entre a vazão simulada e observada em Altamira. O erro (VIES)

apresentou um valor negativo discreto de $-343 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, demonstrando subestimativa nas simulações das vazões mensais. A REQM apresentou o valor de $2343 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, considerado baixo em relação ao grande volume de vazão mensal observado na estação fluviométrica de Altamira.

Figura 17 - Dispersão entre as vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira no período de 2011-2014 (validação).



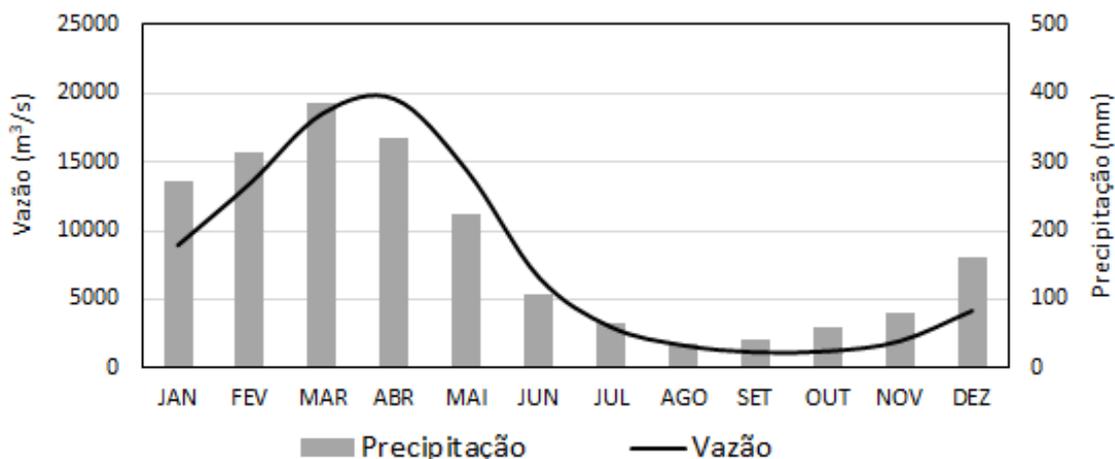
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

LUCAS *et al.*, (2009), simularam a vazão mensal na BHX no Pará, aplicando um modelo determinístico de dois parâmetros e o modelo estocástico ARIMA. O modelo determinístico com uma estrutura simples apresentou bons resultados, porém, mostrou-se sensível a eventos extremos de precipitação. O modelo estocástico, conseguiu capturar a dinâmica das séries temporais, apresentando melhores resultados na simulação comparado ao modelo determinístico, os coeficientes de Nash-Sutcliffe apresentaram valores de 0,73 e 0,90 respectivamente na estação de Altamira. Os resultados do modelo chuva-vazão aplicado neste trabalho, corroboram com o estudo citado, no desempenho satisfatórios desta categoria de modelo na simulação da vazão mensal na BHX, porém, com limitações similares.

Para melhor entender o comportamento entre a chuva e a vazão mensal na BHX foi elaborada a climatologia destas variáveis em Altamira com dados observados para o período de 1981-2010 (Figura 18). De acordo com a Figura 18 é possível observar um regime de chuva bem definido em Altamira, um período menos chuvoso entre os meses de junho a novembro, onde no trimestre agosto, setembro e outubro são registrados os menores volumes de chuva com valores climatológicos mensais abaixo de 50 mm, e um período chuvoso entre os meses

de dezembro a maio, onde no trimestre fevereiro, março e abril são registrados os maiores volumes de chuva registrados, com valores climatológicos mensais acima de 300 mm.

Figura 18 - Climatologia mensal da precipitação pluvial e vazão na estação de Altamira no período de 1981-2010.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

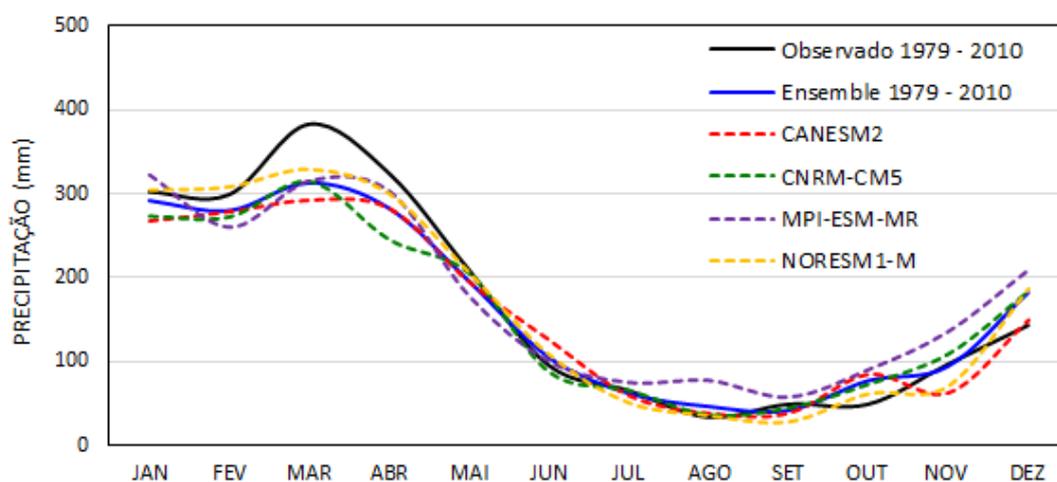
A climatologia da vazão mensal em Altamira segue comportamento similar ao da chuva mensal, com um período de vazante entre os meses de julho a dezembro e um período de cheia entre os meses de janeiro a junho. Conforme demonstrado na Figura 18, o mês de abril apresenta o volume máximo de vazão observado de aproximadamente $20000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e o mês de setembro apresenta o volume mínimo de vazão observado, aproximadamente $1200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De acordo com a climatologia esse pico de vazão observado em abril, em geral ocorre posteriormente ao mês com maior volume de chuva em março. Fica evidente em Altamira a relação e dependência da vazão do mês (t) com a chuva do mês anterior (t - 1), principalmente no período chuvoso e de transição dezembro-janeiro e maio-junho.

Os resultados encontrados no trabalho, com ênfase na estação fluviométrica de referência em Altamira demonstram o desempenho satisfatório da técnica de regressão por componentes principais na simulação das vazões médias mensais na BHX. Com base nestes resultados, a regressão por análise de componentes principais na modelagem chuva-vazão atende uma demanda de previsões menos complexas, mais rápidas e confiáveis principalmente em grandes bacias como na Amazônia, com problemas de disponibilidade de alguns dados de entrada dos modelos conceituais, mostrando-se uma ferramenta útil e operacional para simulações de vazões mensais na BHX.

4.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE DOWSCALING ESTATÍSTICO

Um passo realizado no trabalho foi verificar se no processo de downscaling estatístico, os modelos selecionados seriam capazes de representar bem o clima passado. Assim, foi usado o período de 1979-2010 para treinamento dos modelos. São apresentados os resultados na simulação da climatologia mensal de precipitação pluvial com os quatro modelos e a média dos modelos (ensemble), comparados com os dados observados no mesmo período. A Figura 19 demonstra que não há grandes diferenças entre as simulações e superioridade nos modelos. Com base nestes resultados, optou-se por apresentar os resultados das simulações considerando o conjunto dos quatro modelos (ensemble). Os resultados com o ensemble dos modelos são melhores apresentados comparados a resultados individuais de cada modelo, facilitando a análise estatística e aplicação da pesquisa (DE MOURA *et al.*, 2020).

Figura 19 - Climatologia da precipitação pluvial mensal em Altamira no período de 1979-2010 (valores observados, simulados pelos modelos e ensemble).

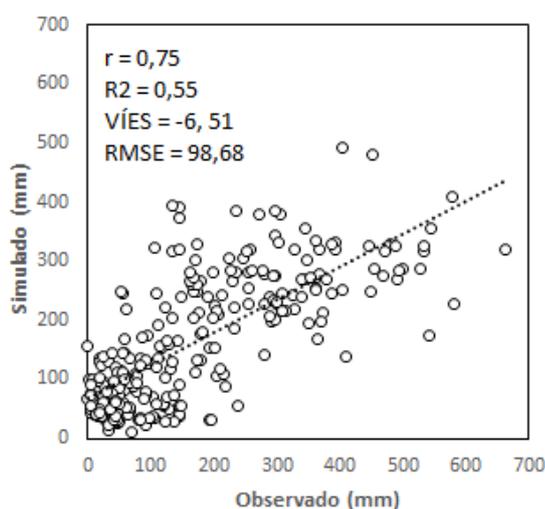


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De acordo com a Figura 19, a climatologia mensal da precipitação pluvial observada em Altamira no período de 1979-2010 e o ensemble dos modelos, os resultados indicam que climatologicamente os modelos conseguiram representa de maneira satisfatória as chuvas mensais observadas na estação de Altamira, exceto para o mês de março, onde houve uma subestimativa em torno de 70 mm, este mês é caracterizado como o mais chuvoso do ano, com um valor próximo a 400 mm/mês. No período de estiagem os valores climatológicos mensais simulados foram próximos dos observados.

De acordo com a dispersão entre as precipitações pluviiais mensais simulada (ensemble) e observadas na estação de Altamira no período de treinamento entre 1979-2010 (Figura 20), os resultados foram considerados satisfatórios, com os valores das métricas estatísticas selecionados de coeficiente de correlação (r) igual a 0,75 e o coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,55. O erro (VIÉS) apresentou um valor negativo discreto de -6,51 mm, demonstrando subestimativa nas simulações das precipitações pluviiais mensais. O RMSE apresentou o valor de 98,68 mm, considerado baixo em relação ao grande volume de precipitação pluvial mensal observado na estação de Altamira.

Figura 20 - Dispersão entre as precipitações pluviiais mensais simuladas e observadas na estação de Altamira no período de 1979-2010.

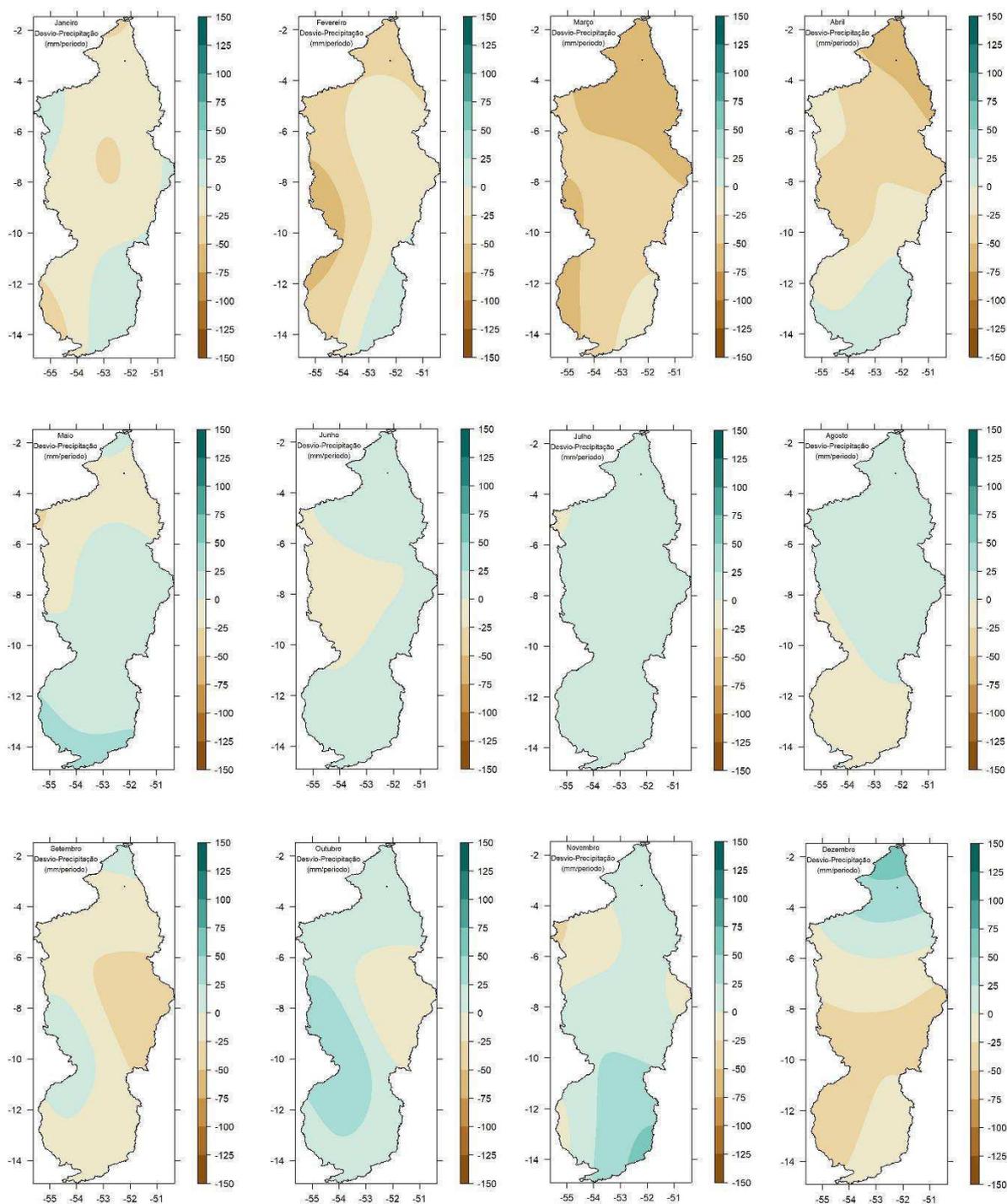


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os desvios de precipitação pluvial mensal entre o conjunto dos modelos (ensemble) e os valores observados para o período entre 1979-2010 na BHX são mostrados na Figura 21. Os resultados demonstram que os modelos de maneira geral subestimaram a precipitação pluvial mensal em alguns meses do ano para BHX. Porém, em meses específicos os resultados foram muito satisfatórios, com desvio pequenos na simulação, destacando principalmente os meses de maio a agosto. Estes resultados indicam que o clima passado no período de treinamento foi bem representado pelos modelos com base nos preditores oriundos da reanálise. Conforme a Figura 21, o mês de março apresentou o maior desvio na subestimativa da precipitação pluvial mensal principalmente na parte norte da BHX. De maneira geral, a parte central e sul da BHX (Médio e Alto Xingu) apresentaram bons resultados nas simulações durante o período de treinamento, demonstrando que o valor simulado na precipitação pluvial mensal foi próximo ao

valor observado neste período. A precipitação pluvial mensal nos cenários futuros foi ajustada para todos os meses do ano, por meio da remoção do viés observado com o ensemble dos modelos no período de treinamento.

Figura 21 - Diferença na climatologia de precipitação pluvial mensal (ensemble dos modelos - observado) no período entre 1979-2010 na BHX.

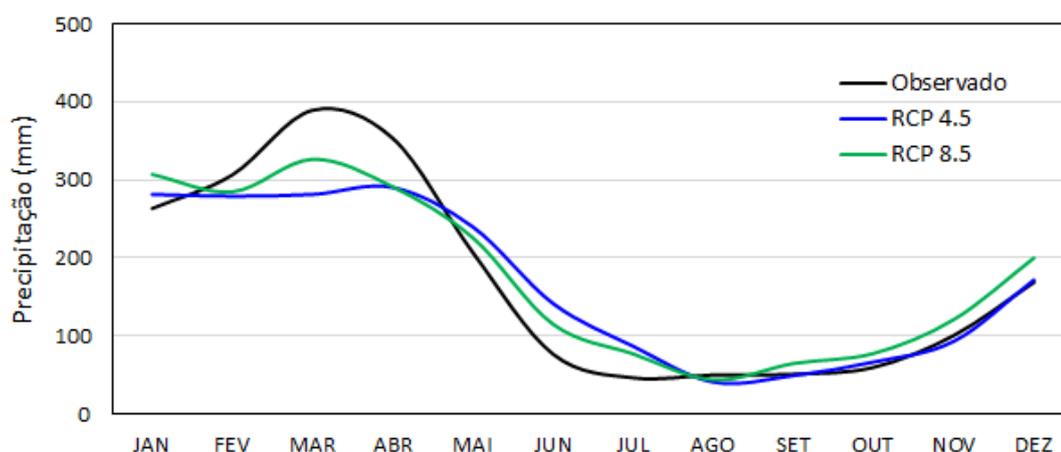


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS CLIMÁTICOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados na simulação da precipitação pluvial mensal na estação de Altamira gerados com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, utilizando o conjunto dos modelos (ensemble) para o período de comparação selecionado, compreendendo os anos de 2011-2020. São apresentados os valores médios mensais de precipitação pluvial simulada com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e os valores médios observados no período de comparação na estação de Altamira. Pode ser observado na Figura 22 que em ambos cenários os modelos subestimam a precipitação pluvial mensal nos meses mais chuvosos (março e abril) e superestimam nos meses menos chuvosos (junho e julho). Para os demais meses do ano, os valores simulados de precipitação pluvial se aproximaram dos valores observados nos dois cenários.

Figura 22 - Média mensal de precipitação pluvial projetada com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 e média mensal observada na estação de Altamira no período de 2011-2020.

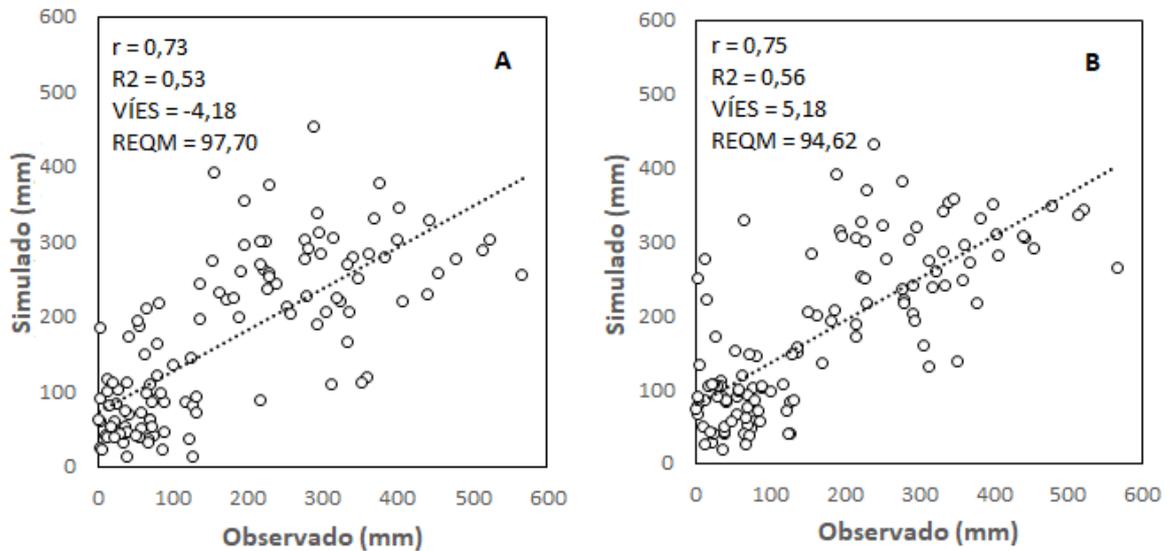


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A partir da Figura 23, verifica-se a dispersão entre as precipitações pluviais mensais observadas e simuladas com os cenários RCP 4.5 (A) e RCP 8.5 (B) na estação de Altamira no período entre 2011-2020. Para ambos os cenários os volumes de chuvas simulados apresentaram alguma discrepância quando comparados aos valores observados como mostra os resultados das métricas estatísticas nas Figuras 23A e 23B. O coeficiente de correlação apresentou os valores de 0,73 e 0,75 respectivamente. No cenário RCP 4.5 o viés apresentou um valor negativo de -4,18 mm (indicando subestimava) e no cenário RCP 8.5 o viés

apresentou um valor positivo de 5,18 mm (indicando superestimativa), o REQM apresentou o maior valor no cenário RCP 4.5 de 97,70 mm e no cenário RCP 8.5 um valor de 94,62 mm.

Figura 23 - Dispersão entre as precipitações pluviométricas mensais simuladas com os cenários RCP 4.5 (A) e 8.5 (B) e observadas na estação de Altamira no período de 2011-2020.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 representam uma concentração de CO₂ equivalente lançados na atmosfera até 2100 de aproximadamente 650 e 1370 p.p.m respectivamente (MOSS *et al.*, 2010). Ao contrário do esperado, a simulação no período de comparação com o cenário mais pessimista RCP 8.5 apresentou uma melhoria discreta nos resultados das métricas estatísticas avaliadas no ensemble dos modelos comparados ao cenário menos pessimista RCP 4.5. Estes resultados indicam que o cenário RCP 8.5 deve apresentar desvios menores nas simulações futuras da precipitação pluvial na BHX.

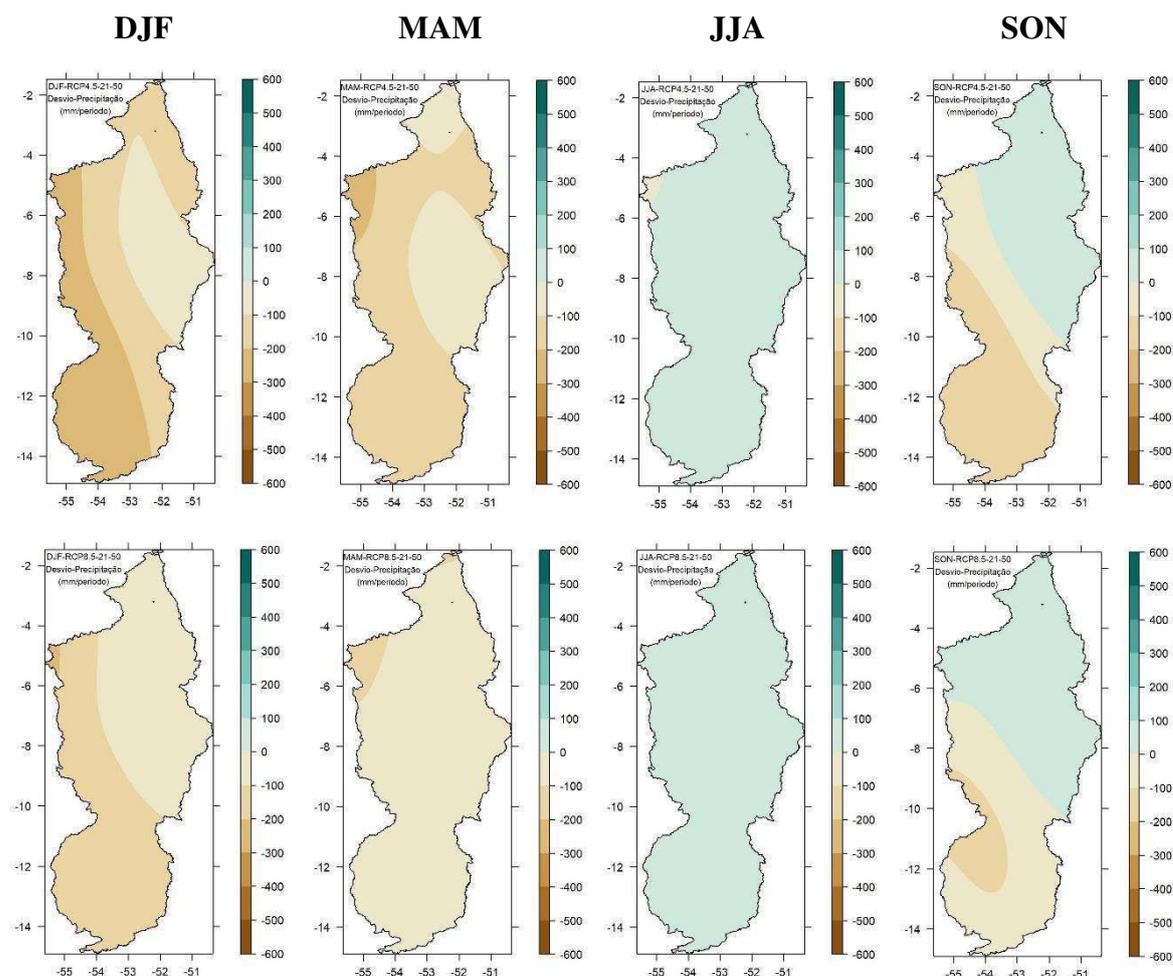
Os resultados observados nos avaliadores de desempenho mostrados estão associados principalmente as diferenças encontradas entre os valores simulados e observados nos dois cenários nos meses de março e abril (período chuvoso) e junho e julho (estiagem). De maneira geral os valores simulados utilizando o ensemble dos quatro modelos nos dois cenários representaram bem a dinâmica da precipitação pluvial mensal em Altamira no período de comparação. Uma alternativa para ajustar os resultados da pesquisa, buscando reduzir o erro associado as simulações dos modelos, foi fazer a correção da precipitação pluvial mensal nos cenários futuros aplicando a remoção do viés observado no período de treinamento.

4.6 CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS

4.6.1 PRECIPITAÇÃO PLUVIAL

As projeções dos cenários futuros de precipitação pluvial serão apresentadas com o conjunto dos modelos (ensemble). São discutidos os resultados da simulação da precipitação pluvial na BHX com os cenários climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 em dois períodos distintos 2021-2050 e 2051-2080, compreendendo dois períodos climatológicas de 30 anos. As composições espaciais da variável (mapas) foram elaboradas por interpolação utilizado o método IDW - Inverse Distance Weighted (Borges *et al.*, 2016). Os desvios sazonais de precipitação pluvial na BHX, no período de 2021-2050 em comparação ao período de 1981-2010 nos dois cenários constam na Figura 24.

Figura 24 - Desvio sazonal de precipitação pluvial na BHX no período 2021-2050, cenário RCP 4.5 (superior) e cenário RCP 8.5 (inferior).

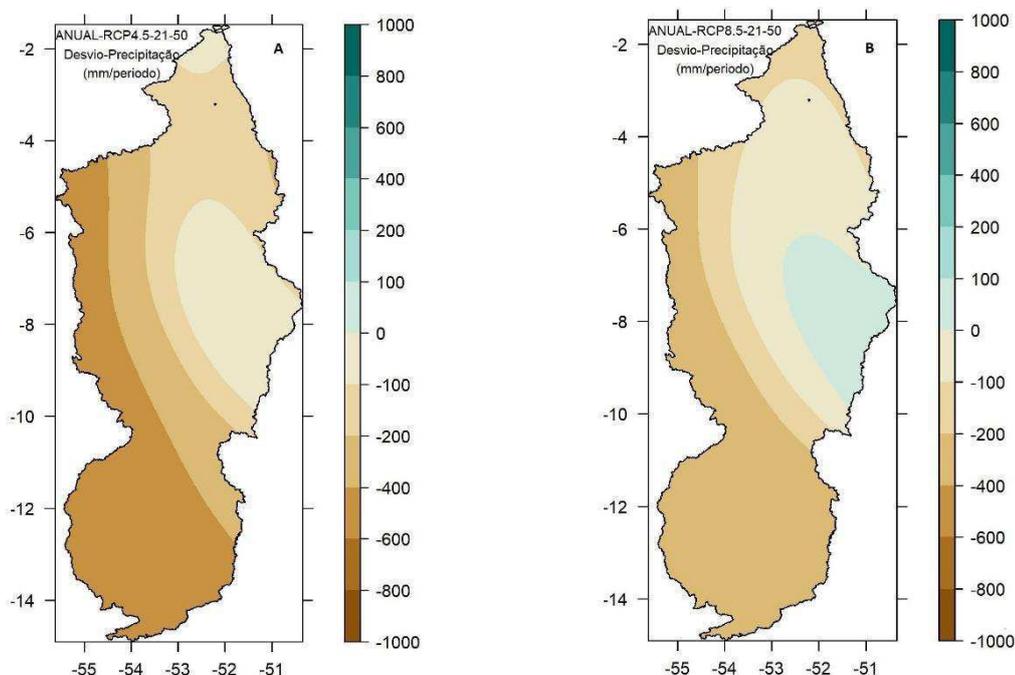


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O comportamento espacial dos desvios é similar nos dois cenários, com menor magnitude no cenário RCP 8.5. Os trimestres DJF (verão) e MAM (outono) apresentaram desvios negativos indicando redução no volume de chuva, principalmente na parte sul e oeste da BHX. Já no trimestre JJA (inverno) houve um acréscimo discreto na precipitação pluvial de até 100 mm em toda a bacia. Um comportamento com sinais opostos foi observado no trimestre SON (primavera), são observados desvios positivos nas partes norte e centro-leste e desvio negativos nas partes sul e centro-oeste da bacia.

Comparando o desvio anual de precipitação pluvial entre a média projetada nos dois cenários no período de 2021-2050 e a climatologia observada de 1981-2010 (Figura 25), há um comportamento similar na distribuição espacial, indicando redução de chuva na BHX, principalmente nas partes sul e oeste da bacia (Alto e Médio Xingu), onde o cenário RCP 4.5 mostra um desvio anual acima de 400 mm (Figura 25A). Na parte norte (Baixo Xingu) nos dois cenários os desvios de precipitação pluvial ficam entre 100 a 200 mm no ano. Na parte centro-leste da bacia (Médio Xingu) no cenário RCP 8.5 as simulações mostram um desvio positivo (Figura 25B), menor que 100 mm no ano, indicando aumento discreto no volume de chuva.

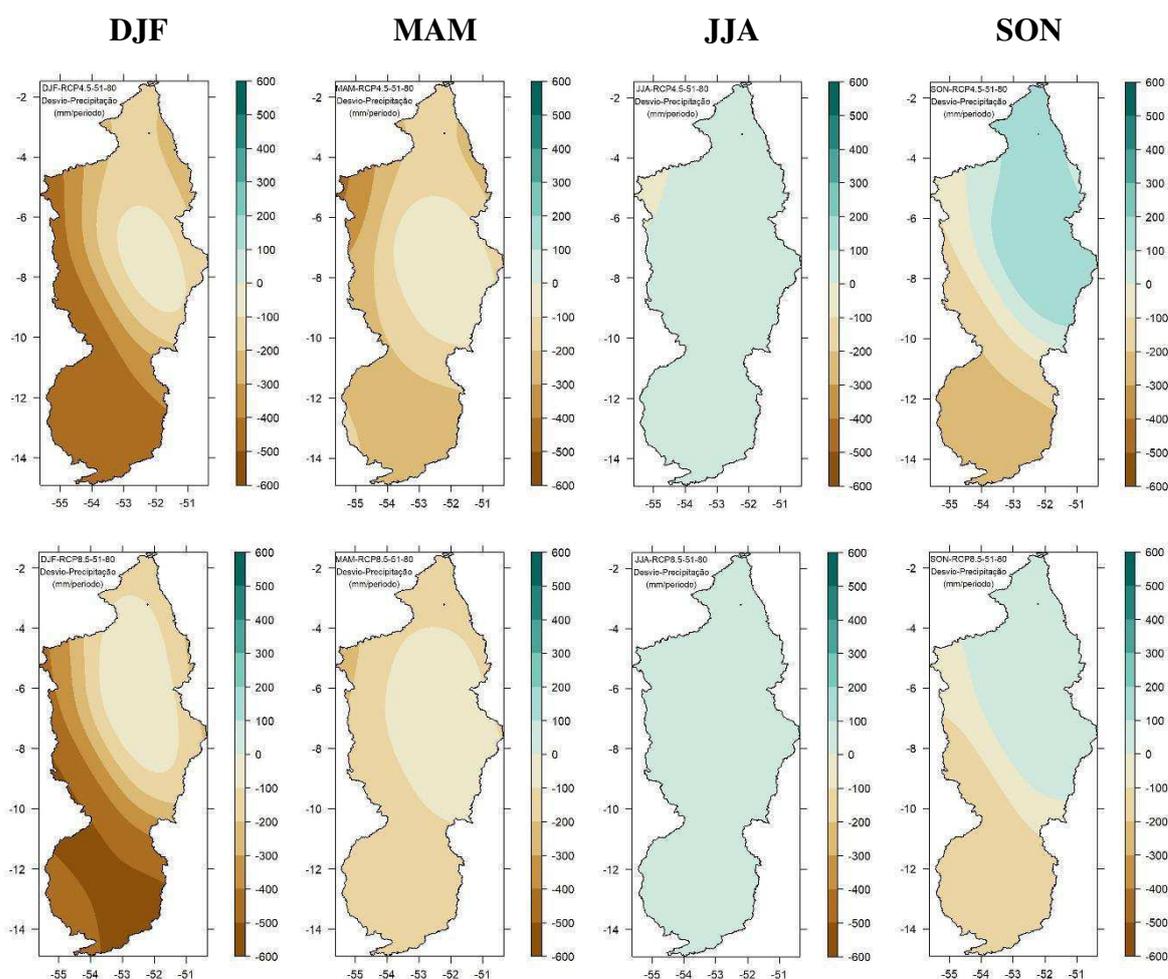
Figura 25 - Desvio anual de precipitação pluvial na BHX no período 2021-2050, cenário RCP 4.5 (A) e cenário RCP 8.5 (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para o período de 2051-2080 o comportamento dos desvios sazonais de precipitação pluvial na BHX também foi similar nos dois cenários (Figura 26). Destaca-se neste período, a redução significativa da precipitação pluvial no trimestre DJF, com desvio negativo indicando forte redução na chuva, principalmente na parte sul e oeste da BHX próximo a 500 mm. No trimestre MAM são projetadas redução na precipitação pluvial nos dois cenários, com menor intensidade. O trimestre JJA mostrou um acréscimo discreto nas chuvas próximo a 100 mm na bacia. O trimestre SON mostrou desvio positivo nas partes norte e centro-leste e desvio negativo nas partes sul e centro-oeste da bacia. De maneira geral, as projeções de ambos cenários indicam redução significativa da precipitação pluvial na estação chuvoso e acréscimo discreto na estação seca, nos dois períodos avaliados.

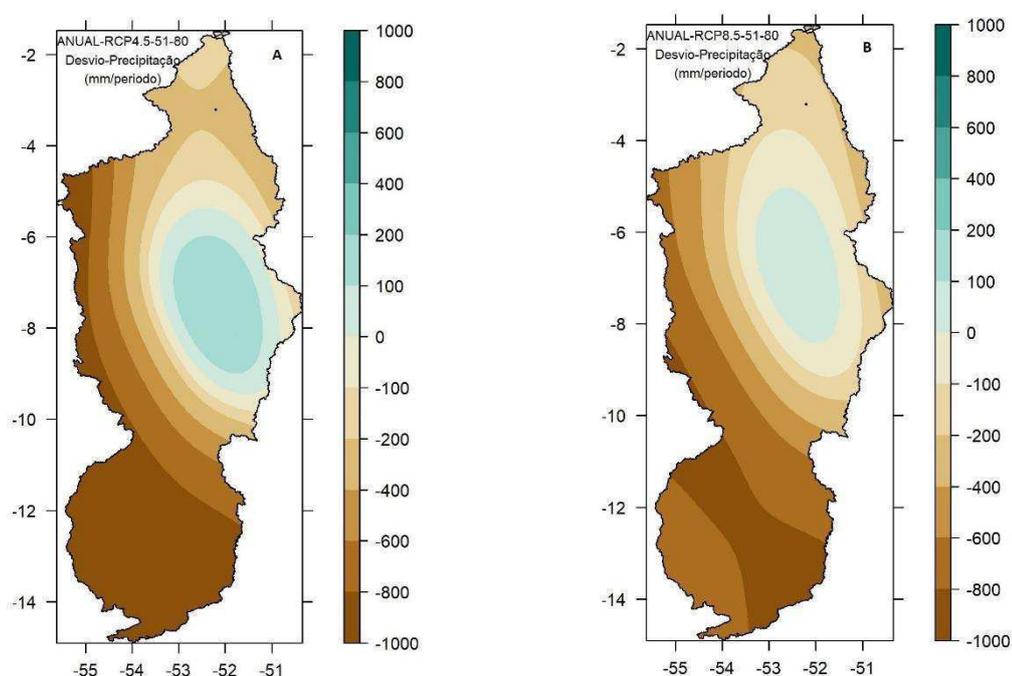
Figura 26 - Desvio sazonal de precipitação pluvial na BHX no período 2051-2080, cenário RCP 4.5 (superior) e cenário RCP 8.5 (inferior).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De acordo com a Figura 27, as magnitudes dos desvios de precipitação pluvial anual nos dois cenários no período de 2051-2080 são maiores comparados ao período anterior, contudo, o comportamento espacial é muito similar, indicando uma forte redução das chuvas na parte sul da BHX (Alto Xingu), onde o cenário RCP 4.5 apresentou um desvio anual acima de 800 mm. Neste período, os dois cenários também indicam aumento discreto no volume de chuva na parte centro-leste da bacia (Médio Xingu). Já na parte norte (Baixo Xingu), não houve grande variação comparado ao período anterior, nos dois cenários os desvios de precipitação pluvial ficaram próximos a 200 mm no ano.

Figura 27 - Desvio anual de precipitação pluvial na BHX no período 2051-2080, cenário RCP 4.5 (A) e cenário RCP 8.5 (B).

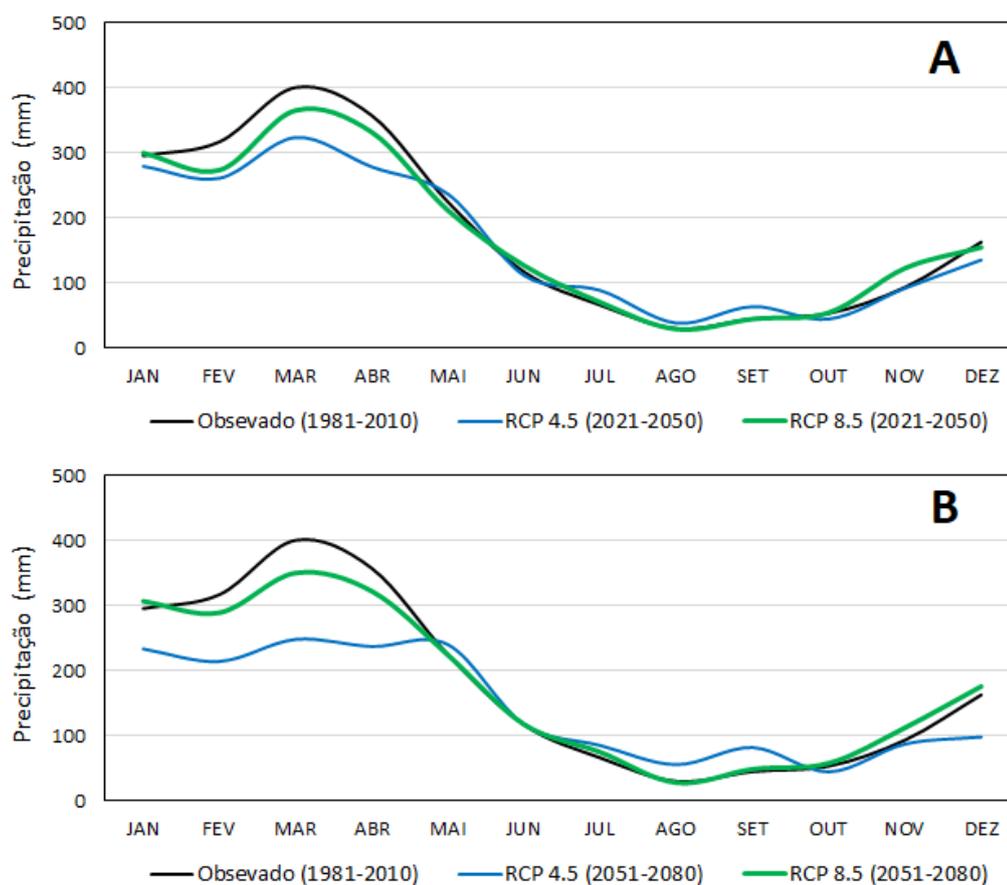


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Nos dois cenários, na parte centro-leste da bacia (Médio Xingu) no período de 2051-2080 as simulações mostram um desvio positivo, entre 100 e 200 mm no ano, indicando um aumento discreto no volume de chuva nesta região da BHX. Destaca-se nesta área um comportamento um pouco diferenciado das demais áreas da bacia, refletido pelas simulações da precipitação pluvial na estação de São Felix do Xingu/PA. A mudança no sinal do desvio pode estar associada a remoção do viés aplicado e na qualidade dos dados no período de treinamento nesta estação.

Em relação as projeções de precipitação pluvial para Altamira, foi avaliada a média mensal projetada com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nos dois períodos e a climatologia observada entre 1981-2010 (Figura 28). As projeções da média mensal de precipitação pluvial para Altamira no período 2021-2050 (Figura 28A), indicam redução das chuvas no período chuvoso, principalmente nos meses de fevereiro, março e abril e um acréscimo discreto no período seco principalmente nos meses de julho, agosto e setembro nos dois cenários. Para o período 2051-2080 (Figura 28B), as projeções no cenário RCP 4.5 indicam redução significativa das chuvas de dezembro até abril e também um acréscimo discreto no período seco nos meses de julho, agosto e setembro. Na média, as projeções de precipitação pluvial com o cenário RCP 4.5 e RCP 8.5 no período seco foram similares, onde não foram observados grandes desvios mensais na precipitação pluvial em Altamira.

Figura 28 - Precipitação pluvial média mensal no período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B) e a climatologia da precipitação pluvial observada em Altamira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em ambos cenários as projeções mantiveram a sazonalidade da precipitação pluvial na BHX e na estação de Altamira nos dois períodos. A Tabela 15, mostra em porcentagem a variação da precipitação pluvial para Altamira nos dois períodos em comparação ao período observado de 1981-2010. O comportamento sazonal foi similar nos dois cenários indicando variação negativa no trimestre DJF e MAM (período chuvoso) e variação positiva nos trimestres JJA e SON (período seco).

Tabela 15. Variação da precipitação pluvial projetada em Altamira em comparação ao período observado de 1981-2010.

CENÁRIOS	RCP 4.5 (%)		RCP 8.5 (%)		
	PERÍODO	2021 – 2050	2051 – 2080	2021 – 2050	2051 – 2080
DFJ		-12,9	-29,6	-6,1	-0,5
MAM		-14,6	-26,2	-7,5	-8,7
JJA		12,0	21,3	6,1	3,2
SON		4,5	11,7	15,8	14,3
ANUAL		-9,7	-19,4	-3,6	-2,6

Nos dois cenários as projeções indicam redução na precipitação pluvial anual em Altamira para os dois períodos. No horizonte mais próximo (2021-2050), as projeções indicam uma redução anual das chuvas de -9,7% e -3,6% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Já para o horizonte mais distante (2051-2080), as projeções indicam uma redução anual das chuvas maior no cenário RCP 4.5 de -19,4% e uma redução de -2,8% no cenário RCP 8.5 (Tabela 10).

Os desvios negativos mostrados nas projeções de precipitação pluvial com o cenário RCP 4.5 foram maiores comparados as projeções do cenário RCP 8.5 nos dois períodos. Esses resultados demonstram que parece haver mais extremos mensais de eventos de chuva neste cenário em comparação ao cenário RCP 8.5. Mesmo com a projeção do cenário RCP 4.5 propondo uma quantidade menor nas emissões dos gases do efeito estufa a partir de 2020 e conseqüentemente no forçamento radioativo, as projeções de precipitação pluvial para o período de 2051-2080, sugere uma redução significativa de aproximadamente 20% no total anual de chuva em Altamira.

O cenário RCP 8.5 representa as projeções climáticas futuras mais pessimistas em função do elevado forçamento radiativo superior a 8.5 W.m^{-2} até 2100. Neste cenário considera-se uma taxa de aumento elevada na concentração dos gases do efeito estufa em especial o dióxido de carbono. O impacto do aquecimento global pode causar alterações na cobertura vegetal (LYRA *et al.*, 2016), contudo, o aumento da concentração deste gás (CO_2) na atmosfera pode favorecer o crescimento das árvores (KIRSCHBAUM e FISCHLIN, 1996), ainda algumas espécies são mais tolerantes as variações ambientais e menos sensíveis as mudanças na concentração do CO_2 na atmosfera (MILES *et al.*, 2004).

Este trabalho não avaliou diretamente mudanças na cobertura e uso do solo (influência do desmatamento na BHX) nas projeções futuras de precipitação pluvial, assim a redução menor encontrada no desvio de precipitação pluvial nas projeções com o cenário RCP 8.5 pode estar relacionada aos fatores acima. Além de que, cenários pessimistas estão associados a maior quantidade de extremos, seja de déficit ou excesso de chuvas (NOBRE e MARENGO, 2017; DOS SANTOS *et al.*, 2020).

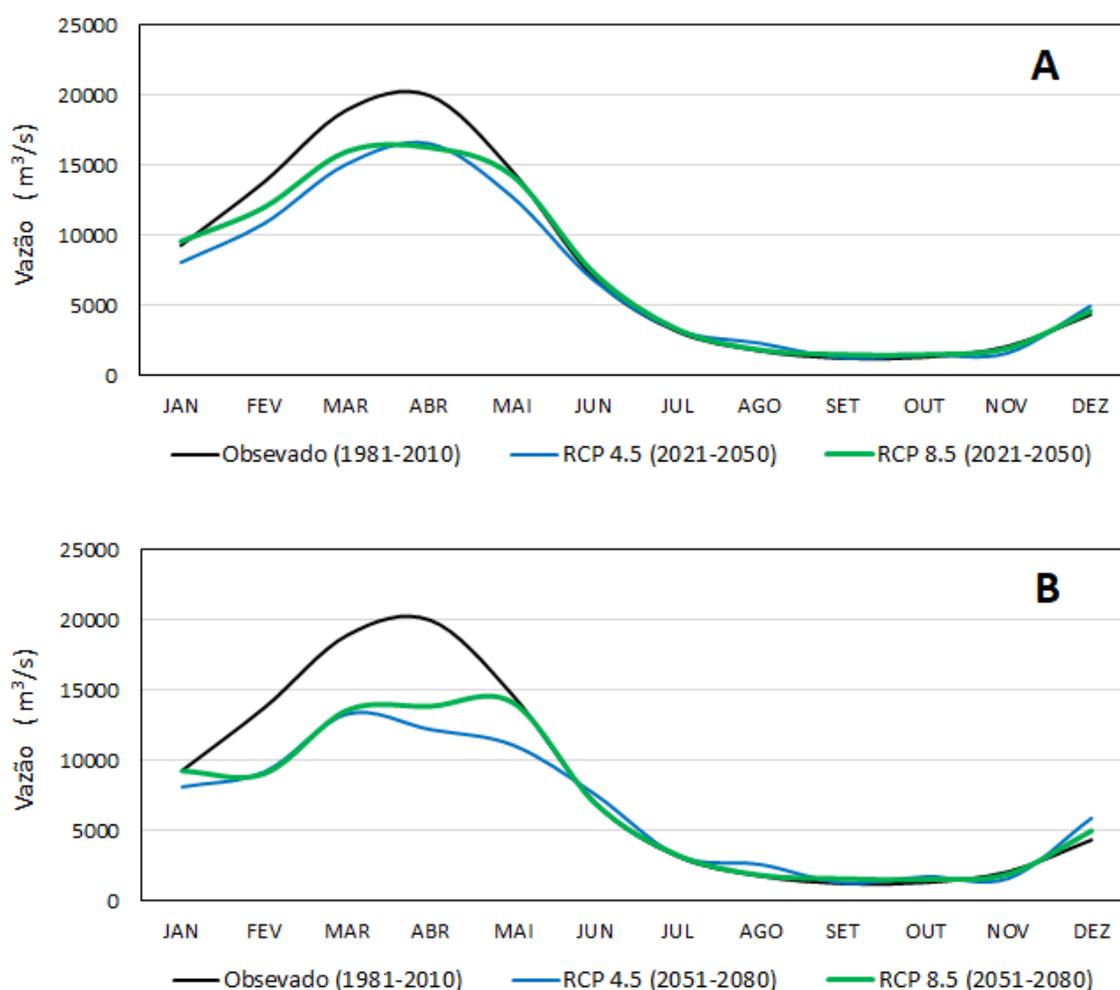
Importante ressaltar que mesmo com a remoção do VIÉS aplicado nos dados de precipitação pluvial mensal projetados nos dois cenários, os modelos seguiram indicando uma redução significativa das chuvas na BHX, principalmente no período chuvoso e na parte sul da bacia. A maioria dos modelos climáticos prevê menos chuvas na região sudeste da Amazônia, incluindo as cabeceiras do rio Xingu (GUIMBERTEAU, *et al.*, 2013; STICKLER *et al.*, 2013). Estes resultados ainda concordam com trabalhos anteriores feitos com simulações do CMIP5, indicando redução de chuvas na bacia Amazônica (CHOU *et al.*, 2014 e MARTINS, *et al.*, 2015; NETO, *et al.*, 2016).

COE *et al.*, (2009) simularam a chuva e a vazão na bacia Amazônica para o horizonte de 2050 acoplando um MCG e um modelo de ecossistema terrestre (CCM3/IBIS), considerando dois cenários: um cenário “estrita governança”, no qual ocorre desmatamento moderado e outro assumindo um cenário 'business-as-usual' assumindo desmatamento generalizado. Com relação a precipitação, ambos cenários indicam redução da precipitação em toda bacia. Os resultados na BHX indicaram uma redução na precipitação de 15% para o cenário controlado e redução de 20% para o cenário de desmatamento generalizado. Embora os cenários utilizados neste trabalho sejam diferentes, o sinal e os valores dos desvios de precipitação encontrados na BHX para o horizonte 2021-2050 são próximos.

4.6.2 VAZÃO

Com base nas projeções futuras de precipitação pluvial na BHX, foram estimadas as vazões mensais utilizando a técnica de PCR nos períodos 2021-2050 e 2051-2080 na estação de Altamira (referência para Belo Monte). Foi comparado a vazão média mensal projetada para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nos dois períodos e a climatologia da vazão mensal observada entre 1981 a 2010 (Figura 29). De maneira geral as projeções das vazões mensais seguiram as projeções da precipitação pluvial em Altamira nos dois períodos, indicando uma redução significativa da vazão no período de cheia principalmente nos meses de fevereiro, março e abril e um aumento discreto da vazão no período de estiagem nos dois cenários.

Figura 29 - Vazão média mensal no período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B) e a climatologia da vazão mensal observada em Altamira.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

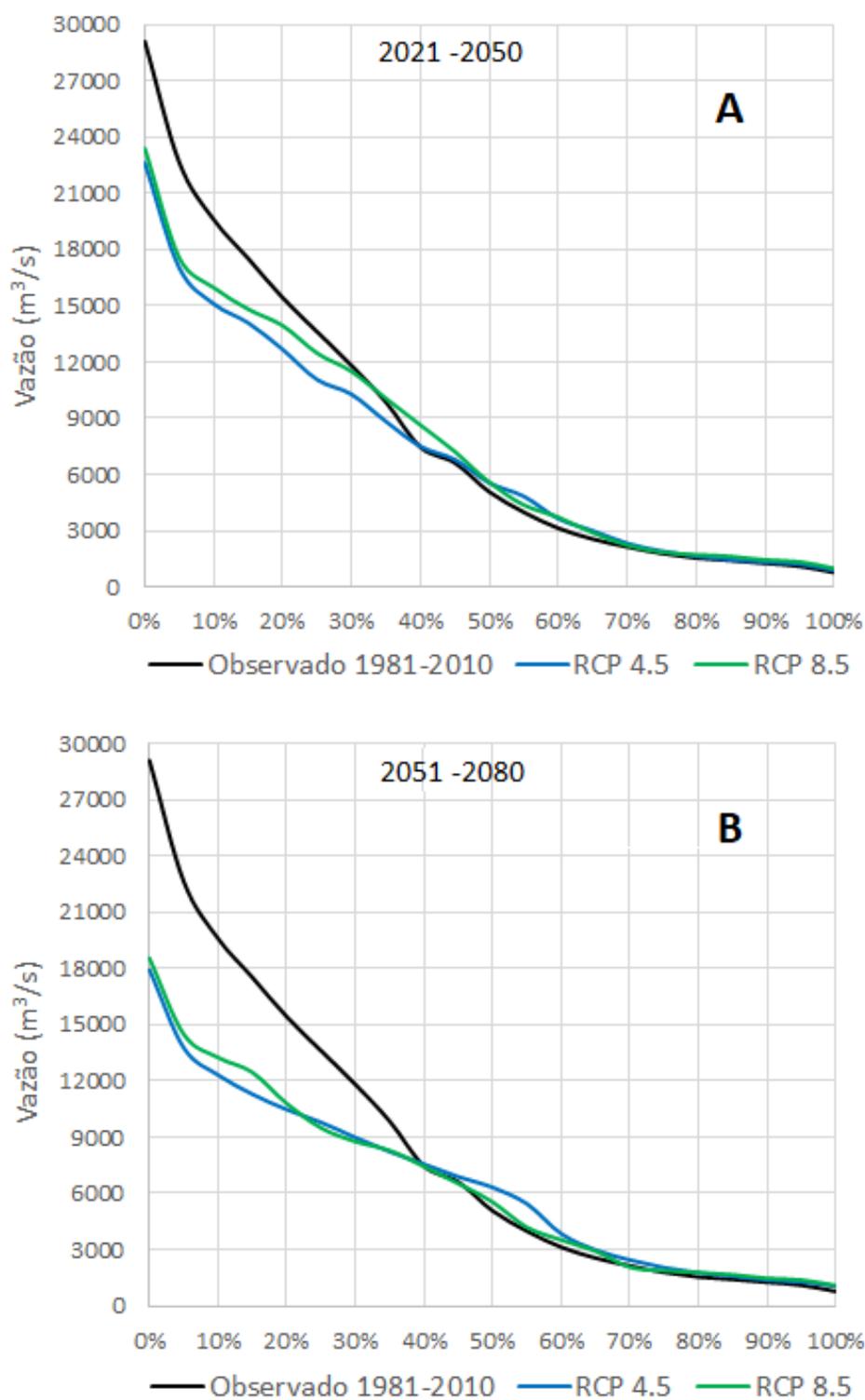
A vazão média mensal projetada para Altamira no período 2021-2050 (Figura 29A) mostra que as projeções mantiveram a sazonalidade da vazão, sem mudanças nos meses com vazões de pico (cheia no mês de abril e estiagem no mês de setembro) nos dois cenários. As projeções com o cenário RCP 4.5 mostraram reduções maiores nas vazões mensais em comparação ao cenário RCP 8.5 no período de cheia. Esse comportamento também foi observado nas projeções de precipitação pluvial em Altamira.

No período 2051-2080 a vazão média mensal projetada para Altamira mostra mudança no mês com vazão de pico no período de cheia nos dois cenários (Figura 29B). No cenário RCP 4.5, os resultados projetaram a vazão de pico com um mês de antecedência, acontecendo em março. Já cenário RCP 8.5, os resultados projetaram a vazão de pico com um mês de atraso, ocorrendo em maio. Esse comportamento pode estar associado a fatores como: remoção do viés nas projeções de precipitação pluvial e as defasagens aplicadas no processo de simulação do modelo chuva-vazão.

Ainda foi avaliado a curva de permanência das vazões mensais em Altamira nos dois períodos em comparação ao período de 1981-2010 (Figura 30). No período de referência a vazão em Altamira apresenta grande variabilidade, com valores frequentes de vazões acima e abaixo da vazão média mensal observada. Esse comportamento se mantém nos dois cenários, principalmente no período de 2021-2050 (Figura 30A). As maiores reduções ocorrem a partir do ponto em que as vazões se igualam ou excedem a Q_{40} até a Q_5 . A curva de permanência indica tendência de vazões mínimas por períodos maiores, a vazão garantida para 95% do tempo (Q_{95} – vazão firme), apresenta um aumento discreto nos dois cenários em ambos os períodos. Já a vazão garantida para 10% do tempo (Q_{10}), mostra uma redução significativa nos dois cenários e principalmente no período de 2051-2080 (Figura 30B), indicando redução das vazões máximas projetadas em Altamira neste período.

A vazão média mensal observada em Altamira no período de referência (1981-2010) de $8114 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é superado ou igualada em 39% do tempo. Essa vazão passará a ser superada ou igualada em 38% e 42% do tempo com as projeções dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente para o período 2021-2050 (Figura 30A). No período de 2051-2080 essa vazão será superada ou igualada em apenas 36% do tempo nos dois cenários (Figura 30B). Ainda pode ser observado que o período 2021-2050, mostra picos de vazão maiores e o período 2051-2080 indica uma menor variabilidade nas vazões projetadas em Altamira.

Figura 30 - Curva de Permanência das vazões médias mensais em Altamira, período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

As variações da vazão projetada para Altamira nos dois períodos em comparação ao período observado de 1981-2010 são mostradas na Tabela 16. Nos trimestres DJF e MAM o comportamento foi similar nos dois cenários, indicando redução na vazão, principalmente no trimestre MAM (período de cheia) e no período 2051-2080, com uma variação negativa de 31,6%. No trimestre JJA as projeções mostraram variações positivas nos dois cenários, indicando um leve acréscimo nas vazões mensais. Já no trimestre SON (período de estiagem) o cenário RCP 4.5 indicou leve redução nas vazões e o cenário RCP 8.5, acréscimo nas vazões, principalmente no período 2051-2080, com uma variação positiva de 8,6%.

Tabela 16. Variação da vazão projetada em Altamira em comparação ao período observado de 1981-2010.

CENÁRIOS	RCP 4.5 (%)		RCP 8.5 (%)		
	PERÍODO	2021 – 2050	2051 – 2080	2021 – 2050	2051 – 2080
DFJ		-13,0	-15,4	-4,6	-15,0
MAM		-17,1	-31,6	-13,1	-22,4
JJA		3,9	12,6	4,8	1,0
SON		-5,8	-0,3	6,9	8,6
ANUAL		-12,9	-20,2	-7,6	-16,0

Nos dois cenários as projeções indicam redução na vazão anual em Altamira nos dois períodos. Similarmente aos resultados da precipitação, os desvios negativos mostrados nas projeções das vazões com o cenário RCP 4.5 foram maiores comparados as projeções do cenário RCP 8.5. No horizonte mais próximo (2021-2050), as projeções indicam uma redução anual menor na vazão, de -12,9% e -7,6% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Já para o horizonte mais distante (2051-2080), as projeções indicam redução acentuada na vazão no cenário RCP 4.5 de -20,2% e uma redução de -16,0% no cenário RCP 8.5 (Tabela 16).

Estudo recente sobre tendência das vazões na bacia amazônica nas últimas décadas, apontam mudanças significativas nas vazões de $\pm 9,5$ mm/ano em toda bacia. As alterações mostram um padrão espacial variável, com aumento da vazão nas partes norte e oeste e redução na parte sul e leste da bacia, incluindo a BHX (HEERSPINK *et al.*, 2020). Projeções futuras seguem mostrando redução nas vazões na BHX, os resultados de COE *et al.*, (2009) para o

horizonte até 2050, indicam redução na vazão de 11% para um cenário de desmatamento controlado e redução de 17% para um cenário de desmatamento generalizado.

As projeções de STICKLER *et al.*, (2013) para o horizonte até 2050 na BHX acoplando um MCG e um modelo de ecossistema terrestre (CCM3/IBIS), indicam uma redução na vazão variando entre 6% a 36% para diferentes cenários de desmatamento na bacia Amazônica. Os resultados citados, são similares aos encontrados nesta pesquisa indicando redução na vazão em Altamira entre -12,9% e -7,6% para o período entre 2021 a 2050, com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente.

NETO, *et al.*, (2016), avaliaram os impactos das mudanças climáticas nos processos hidrológicos das regiões hidrográficas do Brasil no horizonte de 2011 a 2100, utilizando outros MCG's, porém, com os mesmos cenários aplicados neste trabalho. A disponibilidade hídrica diminui em quase toda a área de estudo (com exceção da região Sul) e as principais bacias hidrelétricas são afetadas nas projeções realizadas. Para bacia Amazônica, incluindo a área da BHX foram observadas anomalias negativas de precipitação, umidade do solo e vazão e anomalias positivas de evapotranspiração nas projeções.

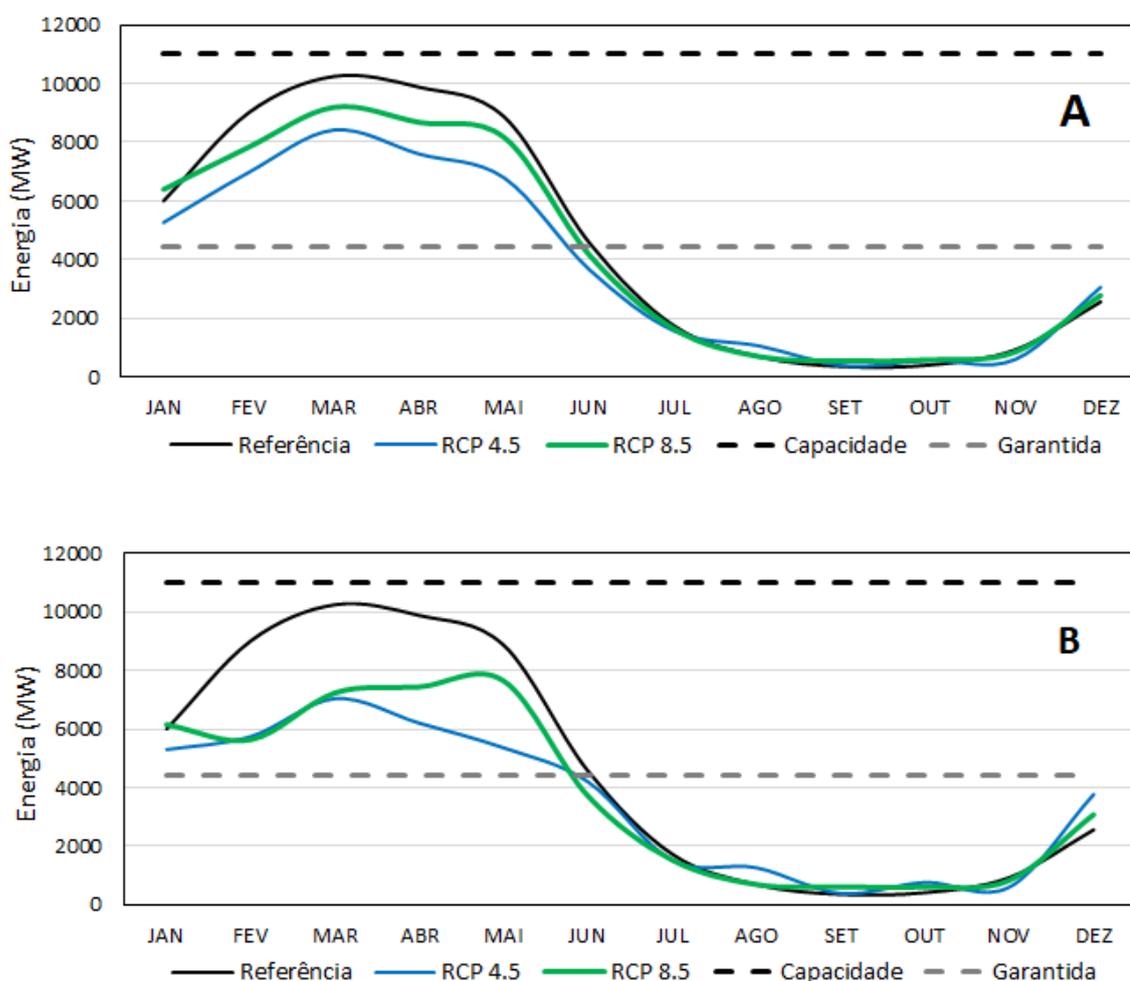
Conforme Nota Técnica sobre Cálculo da Garantia Física do CHBM (EPE, 2010), para que a turbina Francis da casa de força principal (Belo Monte) opere em sua capacidade máxima são necessários uma vazão nominal de $775 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, podendo também operar com segurança sem risco de cavitação a uma carga parcial de $465 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (60% da vazão nominal). De acordo com as especificações acima e considerando que o CHBM é uma usina a fio d'água, as projeções das vazões em Altamira sob os efeitos das mudanças climáticas, indicam que a usina principal Belo Monte poderá ficar inoperante no trimestre SON (período de estiagem) em vários anos nos dois períodos avaliados.

Há outra questão importante a ser observada nas projeções das vazões mensais em Altamira, nos dois cenários em alguns anos a vazão média mensal não atinge $8.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, este comportamento observado na vazão obrigará o operador do CHBM a utilizar a vazão ecológica do Hidrograma B no ano seguinte na geração de energia em Belo Monte. Essas projeções devem aquecer as discussões entre o IBAMA e a Norte Energia sobre a necessidade de revisão do Hidrograma estabelecido para o Trecho de Vazão Reduzida no rio Xingu.

4.6.3 POTENCIAL DA GERAÇÃO DE HIDROENERGIA

O potencial energético em Belo Monte foi estimado com as projeções das vazões em Altamira, nos períodos 2021-2050 e 2051-2080 com os dois cenários. Ainda, são discutidos a comparação do potencial energético estimado com as vazões observadas no período de referência (1981-2010) e com as projeções citadas. Seguindo as projeções de chuva e vazão, os resultados indicam redução na geração de energia no período de cheia e um aumento discreto no período de estiagem nos dois cenários (Figura 31A e 31B).

Figura 31 - Estimativa do potencial de energia média mensal disponível para Belo Monte, período 2021-2050 (A) e período 2051-2080 (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Uma característica da geração de energia em Belo Monte observado no período de referência e que de julho a dezembro (período de estiagem), as projeções não conseguem garantir a energia firme em nenhum dos meses, ficando abaixo dos 4.419 MW estimado pelo projeto. Este padrão no potencial da geração de energia no período de estiagem se mantém nas projeções futuras com os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 nos dois períodos.

No cenário RCP 4.5 as reduções no potencial de energia em Belo Monte são maiores comparados ao cenário RCP 8.5 e o ciclo mensal nos dois períodos se mantém similar ao período de referência. O cenário RCP 8.5 no período de 2051-2080 mostra mudança no mês com o máximo potencial de energia, passando de março para maio, reflexo da mudança no mês com vazão de pico observado nas projeções de vazão para o mesmo período neste cenário.

O potencial da geração de energia projetada em Belo Monte em referência a potência máxima instalada de 11.000 MW são mostrados na Tabela 17. No trimestre DJF as projeções indicam um aproveitamento entre 45,1% e 51,6% do potencial instalado. Como esperado, o melhor desempenho da usina ocorre no trimestre MAM com projeções de 69,1% e 78,9% no período de 2021-2050 nos dois cenários respectivamente. No trimestre JJA as projeções indicam desempenho entre 18,0% e 21,2%. No trimestre SON são projetados o pior aproveitamento de Belo Monte, não ultrapassam 6,1% e 6,3% do aproveitamento no período de 2051-2080 nos dois cenários respectivamente. Em termo anual o cenário RCP 8.5 projeta melhoria discreta na estimativa em comparação ao cenário RCP 4.5 nos dois períodos.

Tabela 17. Potencial da geração de energia projetada em Belo Monte em referência a potência máxima instalada.

CENÁRIOS	RCP 4.5 (%)		RCP 8.5 (%)		
	PERÍODO	2021 – 2050	2051 – 2080	2021 – 2050	2051 – 2080
DJF		46,4	44,9	51,6	45,1
MAM		69,1	56,4	78,9	67,7
JJA		19,0	21,2	19,6	18,0
SON		4,8	5,3	6,1	6,3
ANUAL		38,8	31,6	39,1	34,3

A Tabela 18 mostra a variação do potencial da geração de energia em Belo Monte nos dois períodos em comparação ao período de referência (simulado). Os trimestres DJF, MAM e

JJA indicaram redução nos dois cenários, principalmente no trimestre MAM (período de cheia) e no período 2051-2080, com uma variação negativa de -35,8% e -23,0% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Já o trimestre SON as projeções mostraram variações positivas, exceto no período 2021-2050 no cenário RCP 4.5 com variação de -7,9% em comparação ao período de referência. O cenário RCP 8.5 estima um aumento significativo no potencial de energia no período SON de 17,8% e 21,3% nos dois períodos respectivamente.

Tabela 18. Variação do potencial da geração de energia projetada em Belo Monte em comparação ao período de 1981-2010.

CENÁRIOS	RCP 4.5 (%)		RCP 8.5 (%)		
	PERÍODO	2021 – 2050	2051 – 2080	2021 – 2050	2051 – 2080
DJF		-12,9	-15,7	-3,2	-15,4
MAM		-21,3	-35,8	-10,2	-23,0
JJA		-10,1	-0,1	-7,3	-15,0
SON		-7,9	3,3	17,8	21,3
ANUAL		-13,3	-21,3	-2,8	-14,7

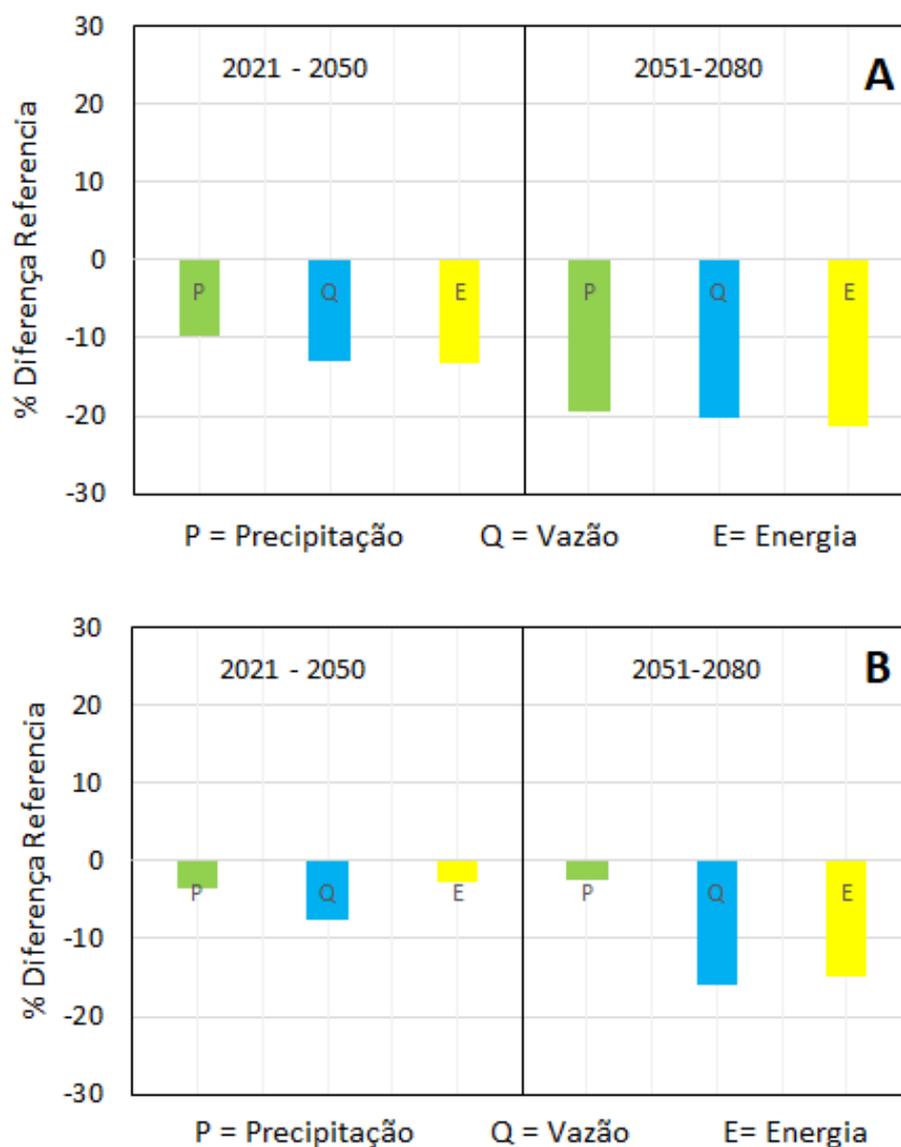
Nos cenários climáticos aplicados as projeções indicam redução anual na geração de energia em Belo Monte nos dois períodos em comparação ao período de referência. No horizonte mais próximo (2021-2050), as projeções indicam uma redução anual na geração de energia de -13,3% e -2,8% nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 respectivamente. Em termo anual houve uma redução menor de apenas 2,8% no cenário RCP 8.5 associados as projeções de chuva e vazão neste período. Já para o horizonte mais distante (2051-2080), as projeções indicam redução anual acentuada na geração de energia no cenário RCP 4.5 de -21,3% e uma redução anual de -14,7% no cenário RCP 8.5 (Tabela 18).

A Figura 32, resume os resultados das variações nas projeções de chuva e vazão em Altamira e da geração de energia em Belo Monte nos dois períodos em comparação ao período de referência. De maneira geral, os resultados apontam para uma redução da chuva e vazão em todos os cenários, afetando a geração de energia elétrica da usina nos dois períodos projetados. As reduções são mais acentuadas no cenário RCP 4.5, no período de 2051-2080 (Figura 32A).

No cenário RCP 8.5 as reduções são menores comparados ao cenário RCP 4.5, principalmente no período de 2021-2050 (Figura 32B). Importante destacar que no trimestre

setembro, outubro e novembro o cenário RCP 8.5 apresentou acréscimo nas projeções de chuva e vazão nos dois períodos avaliados, o comportamento deste trimestre compensou as reduções observadas no período chuvoso, amenizando as reduções anuais deste cenário.

Figura 32 - Variações nas projeções de chuva e vazão na BHX em Altamira e da geração de energia em Belo Monte, RCP 4.5 (A) e RCP 8.5 (B).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

De modo geral, os resultados indicam uma redução na chuva e vazão em Altamira nos dois cenários, afetando o potencial da geração de energia em Belo Monte nos períodos avaliados, principalmente no período de 1951-2080, onde a estimativa média mensal não ultrapassa 8.000 MW (Figura 29). As projeções apontam que o potencial da geração energética

de Belo Monte deverá ficar muito abaixo da capacidade máxima da usina de 11.000 MW, associados aos efeitos das mudanças climáticas projetados como os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 na BHX. Esses resultados reforça o debate sobre a eficiência e desempenho da usina de Belo Monte no futuro (STICLKER *et al.*, 2013).

STICLKER *et al.*, (2013), examinaram os efeitos do desmatamento na vazão e no potencial da geração de energia para Belo Monte. Segundo os autores, o desmatamento da região amazônica inibiu as chuvas na BHX e diminui a vazão de 6% a 36% para diferentes cenários de desmatamento. No cenário 'business-as-usual' assumindo 40% de perda da floresta no horizonte até 2050, a geração de energia projetada caiu para 25% da produção máxima da usina e 40% das projeções do projeto. Embora o trabalho citado não tenha examinado a influência das mudanças climáticas impulsionada pelo acúmulo de gases do efeito estufa, aprisionadores de calor na atmosfera, nem as tendências de eventos extremos, como realizado nesta pesquisa, os resultados concordam com a redução da vazão na BHX e redução do potencial de geração de energia em Belo Monte para o período de 2021 a 2050.

O CHBM possui uma configuração a fio d'água, não possui reservatório de acumulação para ajudar na geração de energia no período de estiagem, ficando dependente apenas da variabilidade natural do rio Xingu. Essa característica agrava sua vulnerabilidade a eventos climáticos extremos e dificultam a capacidade de regulação, pois o período de maior volume de vazão se limita a aproximadamente 4 meses por ano (fevereiro a maio). Os resultados apresentados reforçam a necessidade de considerar as projeções climáticas nos projetos de hidrelétricas a fio d'água.

FARINOSI *et al.*, (2019), avaliaram os impactos das mudanças no uso do solo e os cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5 na vazão da bacia do rio Tapajós na amazonia brasileira. Os resultados para o período de 2026 a 2045, indicam que as mudanças climáticas devem reduzir as vazões nas estações avaliadas em até 20% e mostram aumento da variabilidade interanual. Do ponto de vista da gestão da água, a redução geral das vazões nos rios e sua crescente variabilidade, combinada com alteração e o encurtamento da estação chuvosa, podem afetar potencialmente a produtividade dos grandes sistemas hidrelétricos planejados para a região.

Alguns trabalhos avaliaram a geração de energia no futuro dos sistemas hidrelétricos do Brasil, diante dos cenários de mudanças climáticas: Xingu (STICLKER *et al.*, 2013), Tocantins (VON RAWDOW *et al.*, 2018); Tapajós (MOHOR *et al.*, 2015), Madeira (SIQUEIRA JÚNIOR

et al., 2015) e São Francisco (DE JONG *et al.*, 2018; DA SILVA *et al.*, 2021). Nestes trabalhos até final do século são projetadas forte diminuição da precipitação nas regiões norte e nordeste do Brasil e conseqüentemente redução acentuada no potencial da geração de energia destes sistemas que incluem usinas importantes como Belo Monte, Tucuruí, Teles Pires, Jirau e Xingu.

SIQUEIRA JÚNIOR *et al.*, 2015; avaliaram o impacto das mudanças climáticas na hidrelétrica de Tucuruí no horizonte de 2011 a 2070, os resultados indicaram uma redução entre 27% e 56% do potencial da geração de energia para diferentes cenários. A hidrelétrica de Tucuruí tem capacidade instalada de 8.370 MW, exerce um papel importante na contribuição nacional de energia do país. Os sistemas norte e nordeste representam 20,5% e 21,3% respectivamente do potencial instalado no Brasil (EPE,2020).

Por outro lado, projeções futuras de produção de energia nos sistemas da região sul deve-se beneficiar dos efeitos das mudanças climáticas até o final do século, há indicação de aumento significativo na energia assegurada nesse sistema nos cenários avaliados por DE QUEIROZ *et al.*, (2019). Projeções futuras de precipitação com os cenários RCP 4.5 para o horizonte de 2011 a 2099 na bacia do Prata feitas por MOURÃO *et al.*, (2015), indicam tendência de aumento de precipitação no sul do Brasil e no norte da Argentina a partir de 2041, esses resultados devem favorecer a geração de energia no sistema sul. O sistema sul representa 19% do potencial instalado no Brasil (EPE, 2020), inclui a maior usina hidrelétrica instalada no país a Itaipu Binacional.

Importante destacar que na avaliação do clima passado (1980 a 2016), realizado com as análises das tendências e índices de extremos climáticos de precipitação na BHX, os resultados indicaram redução das chuvas na parte sul da bacia, onde estão localizadas as nascentes do Rio Xingu (Alto Xingu). As projeções com os cenários climáticos aplicados seguiram indicando redução acentuada das chuvas nos dois períodos nesta mesma área da BHX.

Estudos de viabilidade de hidrelétricas em geral não levam em consideração os efeitos das mudanças climáticas nos projetos. Alguns trabalhos discutem a situação atual, perspectivas futuras e impactos das mudanças climáticas nos reservatórios brasileiros (MENDES *et al.*, 2017; DIAS *et al.*, 2018). Investimentos em outras fontes de energia renováveis como energia solar, eólica e biomassa precisam ser feitos para substituir as perdas de produção das hidrelétricas (DE JONG *et al.*, 2018) e garantir um portfólio de geração de energia renovável mais estável e robusto (DE QUEIROZ *et al.*, 2019).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a trazer avanços em relação ao conhecimento climatológico da precipitação pluvial na BHX, apresentando uma Normal Climatológica de referência para o período de 1981-2010, conforme as recomendações da Organização Meteorológica Mundial e ainda permitiu identificar padrões e tendências climáticas das chuvas nas últimas décadas na bacia.

O teste de Mann-Kendall indicou tendência de redução no acumulado anual de precipitação pluvial na área do Alto Xingu, onde estão localizadas as nascentes da BHX. Na área no Médio Xingu, foi observada também tendência negativa da precipitação pluvial no período chuvoso em especial no trimestre dezembro, janeiro e fevereiro. Já no Baixo Xingu, onde está instalada o CHBM, foi observada tendência de aumento no acumulado anual de precipitação pluvial, principalmente no trimestre março, abril e maio.

O teste de Pettitt identificou pontos de mudanças nas séries sazonais e anual da precipitação pluvial na BHX, porém, sem significância estatística em nenhuma das áreas. Os resultados apontam que embora exista um patamar de mudança nas séries sazonais e anual, os dados continuam homogêneos e a tendência encontrada é devido a flutuabilidade natural do clima, intrínseca a própria natureza dos dados de precipitação, que respondem a diferentes modos de variabilidade climática.

Na avaliação dos índices climáticos extremos de precipitação pluvial, embora muitas das séries temporais analisadas na BHX não tenham apresentado tendências significativas ao nível de 5%, os resultados gerais indicam tendências positivas com o aumento das chuvas diárias na parte norte da bacia (Baixo Xingu). Além disso, indicam tendência negativa, com diminuição das chuvas nas áreas centro e sul (Médio e Alto Xingu).

A técnica de Regressão por Componentes Principais aplicada à simulação das vazões mensais apresentou bons resultados em todas as estações selecionadas. Para Altamira, referência da BHX, os resultados foram promissores e satisfatórios, com o modelo capaz de capturar a dinâmica da série temporal e mostrando excelente desempenho nas simulações das vazões nos meses de estiagem (maio a outubro), porém, com leve subestimativa no período chuvoso (novembro a abril). Assim, previsões de vazões mensais utilizando esta técnica podem ser realizadas a partir de dados de previsões climáticas sazonais e/ou cenários climáticos.

O downscaling estatístico mostrou-se um método eficiente na simulação da precipitação pluvial mensal na BHX. Os resultados observados apresentaram valores satisfatórios dos índices de destreza para a precipitação pluvial simulada utilizando o ensemble dos quatro MCG's em comparação aos valores observados no período de referência nos dois cenários. De maneira geral, representaram bem a dinâmica da precipitação pluvial mensal com uma subestimativa no período chuvoso (especialmente em março e abril) e uma superestimativa discreta no período seco.

Projeta-se redução da precipitação pluvial na BHX, em Altamira, em ambos os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para o período de 2021-2080 em comparação com o período de referência (1981-2010). Como esperado, as projeções de chuvas refletem na redução das vazões mensais em Altamira nos dois períodos analisados (2021-2050 e 2051-2080) e consequentemente na redução do potencial de geração de energia em Belo Monte. No período chuvoso (março, abril e maio), os resultados indicaram reduções significativas nas projeções. Já no período seco (trimestre setembro, outubro), houve um aumento discreto nas projeções de chuva e vazão.

As projeções do cenário RCP 4.5 indicaram maiores reduções de chuva e vazão nos dois períodos em comparação ao cenário RCP 8.5. O cenário RCP 8.5 é o mais pessimista, ou seja, em geral apresenta as maiores modificações médias globais do clima como um todo. Entretanto, no caso da BHX, o RCP 4.5 apresentou mudanças mais drásticas do que o RCP 8.5. Diante deste cenário, até 2080 espera-se uma redução anual no potencial de geração de energia em Belo Monte de 21,3% em comparação ao período de referência e aproveitamento de 38,8% do potencial máximo instalado.

Os impactos das mudanças climáticas podem influenciar na intensificação de eventos extremos nas próximas décadas como enchentes e secas. A região da BHX vem sofrendo muito com a pressão do agronegócio e avanço das áreas para agricultura e pecuária, gerando aumento na demanda de consumo de água para atender aos usos múltiplos na bacia, estes fatores associado as mudanças climáticas podem influenciar a disponibilidade de água para geração de energia em Belo Monte. Os empreendedores do CHBM e tomadores de decisão do governo podem usar essas informações para adotar políticas energéticas e medidas de mitigação aos possíveis impactos destes cenários.

As hidrelétricas a fio d'água precisam considerar os impactos das mudanças climáticas no gerenciamento e no planejamento das projeções de geração de energia já que não possui

reservatório de acumulação. Os resultados apresentados ainda apoiam a necessidade de reduzir a geração de energia térmica que usa combustíveis fósseis e emite CO₂ na atmosfera e investir em outras fontes de energia renovável (eólica e solar) para compensar as perdas de produção hidrelétrica de Belo Monte.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar os índices de extremos climáticos de precipitação para o ensemble dos cenários projetados na BHX aplicando o Rclindex;
- Aplicar um modelo conceitual na simulação das vazões na BHX (tipo SWAT), e comparar com as projeções de vazões do modelo empírico chuva-vazão aplicado neste trabalho;
- Gerar as mesmas projeções futuras desta pesquisa com os novos cenários do IPCC (Special Report on Emissions Scenarios).

6. REFERÊNCIAS

- ADDOR, N.; SEIBERT, J. Bias correction for hydrological impact studies—beyond the daily perspective. **Hydrological Processes**, v. 28, p. 4823-4828, 2014. <https://doi.org/10.1002/hyp.10238>
- ALCÂNTARA, C. R.; DIAS, M. A. S.; SOUZA, E. P.; COHEN, J. C. Verification of the role of the low-level jets in Amazon squall lines. **Atmospheric Research**, v. 100, p. 36-44, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.023>
- ALEXANDRE, A. M. B. Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas. Fortaleza, Ceará, 2012. 293p. **Tese (Doutorado em Engenharia Civil)** - Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; CUBO, P.; RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal Climatology**, v. 37, p. 2013-2026, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>
- ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Hydrological models, types and applications used more. **Revista da FAE**, v. 20, p. 129 - 137, 2017.
- ANA - AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. HIDROWEB v3.1.1 - Séries Históricas de Estações. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>, 2018. Acessado em 05 de agosto de 2019.
- ANA - AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do rio Amazonas: Diagnóstico. Brasília, 2013.
- ALVES, L.M. Análise estatística da sazonalidade e tendências das estações chuvosas e seca na Amazônia: Clima presente e projeções futuras. São José dos Campos/SP, 2016p. **Ph.D. thesis**, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016.
- ARAÚJO, P. H. C.; SILVA, F. F.; GOMES, M. F. M.; FÉRES, J. G.; BRAGA, M. J. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região Nordeste do Brasil. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 45, p. 46-57, 2014.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; J. R. WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part i: model development. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 34, p. 73-89, 1998. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- ARORA, V. K.; BOER, G. J.; CHRISTIAN, J. R.; CURRY, C. L.; DENMAN, K. L.; ZAHARIEV, K.; FLATO, G. M.; SCINocca, J. F.; MERRYFIELD, W. J.; LEE, W. G. The effect of terrestrial photosynthesis down-regulation on the 20th century carbon budget simulated with the CCCma earth system model. **Journal of Climate**, v. 22, p. 6066-6088, 2009. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3037.1>

ARRAUT, J. R.; NOBRE, C.; BARBOSA, H. M. J.; OBREGON, G.; MARENGO, J. A. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 25, p. 543-556, 2012. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4189.1>

BANCO DO BRASIL. Climate Change, Scenario Analysis and Strategy. Brasília, 2019.

BAEZ-GONZALEZA, A. D.; TORRES-MEZAB, M. J.; ROYO-MARQUEZC, M. H.; KINIRYD, J. R. Climate variability and trends in climate extremes in the priority conservation area El Tokio and adjacent areas in northeastern Mexico. **Weather and Climate Extremes**, v. 22, p. 36 – 47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.001>

BENTSEN, M.; BETHKE, I.; DEBERNARD, J. B.; IVERSEN, T.; KIRKEVAG, A.; SELAND, O.; DRANGE, H.; ROELANDT, C.; SEIERSTAD, I. A.; HOOSE, C.; KRISTJÁNSSON, J. E. The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 1: Description and basic evaluation of the physical climate. **Geoscientific Model Development**, v. 6, p. 687-720, 2013. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-687-2013>

BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J., SCHOFIELD, N. AND TAGG A.F. Testing a physically based flood forecasting model (TOPMODEL) for three UK catchments. **Journal of Hydrology**, v. 69, p. 119-143, 1984. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90159-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90159-8)

BOOTH, E. L. J.; BYRNE, J. M.; JOHNSON, D. L. Climatic changes in western North America, 1950-2005. **International Journal of Climatology**, v. 32, p. 2283-2300. 2011. <https://doi.org/10.1002/joc.3401>

BORGES, P. A.; FRANKE, J.; ANUNCIACÃO, Y. M. T.; WEISS, H.; BERNHOFER, C. Comparison of spatial interpolation methods for the estimation of precipitation distribution in Distrito Federal, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 123, p. 335–348, 2016. doi: 10.1007/s00704-014-1359-9

BOZZINI, P.L.; MELLO JUNIOR, A.V. Previsões de precipitação de modelos atmosféricos como subsídio à operação de sistemas de reservatório. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 99-109, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786351032>

BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the upper Paraguay River Basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, p. 635-646, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000494](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000494)

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, p. 88-108, 2004. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2)

CHANG, M., DEREZYNSKI, C., FREITAS, M. A. V., CHO, S. C. Climate change index: A proposed methodology for assessing susceptibility to future climatic extremes. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 326-337, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.33029>

CHEN, J.; BRISSETTE, F. P.; CHAUMONT, D.; BRAUN, M. Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America, **Water Resources Research**, v. 49, p. 4187-4205, 2013. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20331>

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J. BYSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-525, 2014. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>

CHOW, S. C.; NOBRE, P.; MAIA, A.; FREITAS, E.; SAMPAIO, G.; CAVALCANTI, I.; CEBALLOS, J.; GAN, M.; COSTA, M. H.; BOTTINO, M. J.; CAMARGO, R.; FIGUEIRO, N. S.; SOARES, W.; PIMENTA, F.; VALVERDE, M. Avaliação de modelos globais e regionais climáticos. In: **Base científica das mudanças climáticas: v1 - primeiro relatório da avaliação nacional**. Rio de Janeiro: UFRJ/PBMC; 2014.

CHRISTIAN, J. R.; ARORA, V. K.; BOER, G. J.; CURRY, C. L.; ZAHARIEV, K.; DENMAN, K. L.; FLATO, G. M.; LEE, W. G.; MERRYFIELD, W. J.; ROULET, N. T.; SCINOCCHA, J. F. The global carbon cycle in the Canadian Earth system model CanESM1: preindustrial control simulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, G03014, 2010. <https://doi.org/10.1029/2008JG000920>

COE, M. T., COSTA, M. H., SOARES-FILHO, B. S. The influence of historical and potential future deforestation on the streamflow of the Amazon River – Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, p. 165-174, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>

COHEN, J. C.; SILVA DIAS, M. A.; NOBRE, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. **Monthly Weather Review**, v. 123, p. 3163-3174, 1995. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2)

COLLISCHONN, W.; DANIEL ALLASIA, D.; BENEDITO C. DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGH-IPH model for a larger scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878–895, 2007. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>

COSTA, R. L., BAPTISTA, G. M. M., GOMES, H. B., SILVA, F. D. S., DA ROCHA JÚNIOR, R. L., SALVADOR, M. A., HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 100254, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>

CPRM. Bacia do Xingu – Características. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/sace/xingu_caracteristicas.php, 2019. Acessado em março 2020.

CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. El Niño e La Niña. Cachoeira Paulista. Disponível em <http://enos.cptec.inpe.br/>, 2020. Acessado em março 2020.

CROITORU, A. E.; PITICAR, A.; BURADA; D. C. Changes in precipitation extremes in Romania. **Quaternary International**, v. 415 p. 325-335, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.028>

DA 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**, v. 33, p. 665-675. 2018b. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334008>

DA SILVA, M. V. M.; SILVEIRA, C. S.; DA COSTA, J. M. F.; MARTINS, E. S. P. R.; VASCONCELOS JÚNIOR, F. C. Projection of Climate Change and Consumptive Demands Projections Impacts on Hydropower Generation in the São Francisco River Basin, Brazil. **Water**, v. 13, 332, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13030332>

DA SILVA, P. E., SILVA, C. M. S., SPYRIDES, M. H. C., ANDRADE, L. M. B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 1-17, 2018a. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>

DA SILVA, P. E., SILVA, C. M. S., SPYRIDES, M. H. C., ANDRADE, L. M. B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 1-17, 2018b. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>

DA SILVA, P. E., SANTOS E SILVA, C. M., SPYRIDES, M. H. C., ANDRADE, L. M. B. Analysis of climate extreme indices in the Northeast Brazil and the Brazilian Amazon in the period from 1980 to 2013. **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**, v. 42, p. 137-148, 2019. https://doi.org/10.11137/2019_2_137_148.

DE AZAMBUJA, A. M. S. Climatologia da precipitação na bacia hidrográfica do rio Xingu. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2018.

DE JONG, P.; TANAJURA, C. A. S.; SÁNCHEZ, A. S.; DARGAVILLE, R.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A. Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. **Science of the Total Environment**, v. 634, p. 1540-1553, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.256>

DE QUEIROZ, A. R.; FARIA, V. A. D.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. Hydropower revenues under the threat of climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 133, p. 873-882, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.050>

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.; HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HOLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KALLBERG, P.; KOHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J. J.; PARK, B. K.; PEUBEY, C.; DEROSNAY, P.; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J. N.; VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system.

Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 137, p. 553–597, 2011. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

DE MENEZES, J. B., BANDEIRA, O. M., LEITE, D. T. A construção do complexo hidrelétrico de Belo Monte: quarta maior do mundo em capacidade instalada. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens** - Edição Especial Belo Monte, v. 4, p. 5-21, 2017.

DE MOURA, C. N.; SEIBERT, J.; MINE, M. R. M. Uncertainties in Projected Rainfall over Brazil: The Role of Climate Model, Bias Correction and Emission Scenario. California Digital Library, 2020. <https://doi.org/10.31223/osf.io/2p9wg>

DE OLIVEIRA, B. F. A.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communication Earth Environment**, v. 2, 207, 2021. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>

DE OLIVEIRA, G.; CHEN, J.M.; MATAVELI, G.A.V.; CHAVES, M.E.D.; RAO, J.; STERNBERG, M.; DOS SANTOS, T.V.; DOS SANTOS, C.A.C. Evapotranspiration and Precipitation over Pasture and Soybean Areas in the Xingu River Basin, an Expanding Amazonian Agricultural Frontier. **Agronomy**, v. 10, 1112, 2020. <https://doi.org/10.3390/agronomy10081112>

DE SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L. P.; FISCH, G.; NOBRE, C. On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic Dipole Pattern on the Amazonian Rainfall during 1960-1998. **Acta Amazonica**, v. 30, p. 305-318, 2000.

DE SOUZA, E. B., KAYANO, M. T., AMBRIZZI, T. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn rainy season. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 81, p. 177–191, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0081-4>

DE SOUZA, E. B.; ROCHA, E. J. P. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 142-152, 2006.

DEVI, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1001–1007, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>

DIAS, V. S., LUZ, M. P., MEDERO, G. M., NASCIMENTO, D. T. F. An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. **Water**, v. 10, p. 1-18, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10050592>

DOS REIS, L.C., SANTOS E SILVA, C.M., BEZERRA, B.G., MUTTI, P.R., SPRYRIDES, M.H.C., DA SILVA, P.E. Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 177, p. 4457-4478, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>.

DOS SANTOS, C. A. C.; SATYAMURTY, P.; SANTOS, E. M. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. **Acta Amazonica**, v. 42, p. 329-336, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000300004>

DOS SANTOS, C. A. C.; OLIVEIRA, V. G. D. Trends in Extreme Climate Indices for Pará State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 13-24, 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150053>

DOS SANTOS, C. A.; LIMA, A. M. M.; FRANCO, V. S.; ARAÚJO, I. B.; MENEZES, J. F. G.; GOMES, N. M. O. Distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Xingu. **Nucleus**, v. 13, p. 223-230, 2016. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1630>

DOS SANTOS, D. J.; PEDRA, G. U.; DA SILVA, M. G. B.; JUNIOR, C. A. G.; ALVES, L. M.; SAMPAIO, G.; MARENGO, J. A. Future rainfall and temperature changes in Brazil under global warming levels of 1.5°C, 2°C and 4°C. **Sustainability in Debate**, v. 11, p. 57-73, 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150053>

DUAN, L.; LIU, T.; WANG, X.; LUO, Y.; WU, L. Development of a regional model estimating annual runoff in the Hailar river basin of China. **Journal Water Resource and Proction**, v. 2, p. 934–943, 2010. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.211111>

ELETROBRAS. Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte: Estudo de Impacto Ambiental. Rio de Janeiro - RJ, Brasil. 2009.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Estudos para Licitação da Expansão da Geração: Cálculo da Garantia Física da UHE Belo Monte (Nota Técnica EPE-DEE-RE-004/2010-R0), 2010. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acessado em março 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Anuário Estatístico de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acessado em março 2021.

ESPINOZA, J. C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, A. M.; SEGURA, R. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate Dynamics**, v. 52, p. 5413–5430, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>

ESQUIVEL, A.; LLANOS-HERRERA, L.; AGUDELO, D.; PRAGER, S. D.; KATIA FERNANDES; ROJAS, A.; VALENCIA, J. J.; RAMIREZ-VILLEGAS, J. Predictability of seasonal precipitation across major crop growing areas in Colombia. **Climate Services**, v. 12, p. 36-47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.09.001>

EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G. A.; SENIOR, C. A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R. J.; TAYLOR, K. E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 1937–1958, 2016. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>

FARINOSI, F.; ARIAS, M. E.; LEE, E.; LONGO, M.; PEREIRA, F. F.; LIVINO, A.; MOORCROFT, P. R.; BRISCOE, J. Future climate and land use change impacts on river flows in the Tapajós Basin in the Brazilian Amazon. **Earth's Future**, v. 7, p. 993–1017, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019EF001198>

FERREIRA, D. B. S.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, J. V. Identificação de extremos de precipitação em municípios do Estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos Pacífico e Atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 197-222, 2020. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.64630>

FILHO, F. A. S.; LALL, U. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, p. 61-74, 2004. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v9n2.p61-74>

FOLLAND, C.K.; MILLER, C.; BADER, D.; CROWE, M.; JONES, P.; PLUMMER, N.; RICHMAN, M.; PARKER, D.E. ROGERS, J. SCHOLEFIELD, P. Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes, Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997 Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extremes. **Climatic Change**, v. 42, p. 31-43, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005447712757>

FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1547-1578, 2007. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>

FRANCO, V. S.; DE SOUZA, E. B.; PINHEIRO, A. N.; DIAS, T. S.; AZEVEDO, F. T. M.; SANTOS, J. C. C. Evolução mensal da cota fluviométrica do Rio Xingu em Altamira-PA associada aos eventos El Niño e La Niña. **Ciência e Natura**, v. 37, p. 104-109, 2015. <https://doi.org/10.5902/2179460X16223>

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, 150066, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GALLANT, A. J. E.; KAROLY D. J.; GLEASON, K. L.: Consistent Trends in a Modified Climate Extremes Index in the United States, Europe, and Australia. **Journal of Climate**, v.27, p. 1379–1394. 2014. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00783.1>

GEMMER, M.; FISCHER, T.; JIANG, T.; SU, B.; LIU LIU, L. Trends in Precipitation Extremes in the Zhujiang River Basin, South China. **Journal of Climate**, v. 24, p. 750–761, 2011. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3717.1>

GIORGETTA, M.; JUNGCLAUS, J.; REICK, C.; LEGUTKE, S.; BADER, J.; BÖTTINGER, M.; BROVKIN, V.; CRUEGER, T.; ESCH, M.; FIEG, K.; GLUSHAK, K.; GAYLER, V.; HAAK, H.; HOLLWEG, H. D.; ILYINA, T.; KINNE, S.; KORNBLUEH, L.; MATEI, D.; MAURITSEN, T.; MIKOLAJEWICZ, U.; MUELLER, W.; NOTZ, D.; PITHAN, F.; RADDATZ, T.; RAST, S.; REDLER, R.; ROECKNER, E.; SCHMIDT, H.; SCHNUR, R.; SEGSCHNEIDER, J.; SIX, K.; STOCKHAUSE, M.; TIMMRECK, C.; WEGNER, J.; WIDMANN, H.; WIENERS, K. H.; CLAUSSEN, M.; MAROTZKE, J.; STEVENS, B. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the coupled model intercomparison project phase 5. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 5, p. 572-597, 2013. <https://doi.org/doi:10.1002/jame.20038>

GRIMM, A. M. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 25, p. 537–554, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1>

GUIMBERTEAU, M.; RONCHAIL, J.; ESPINOZA, J. C.; LENGAIGNE, M.; SULTAN, B.; POLCHER, J.; DRAPEAU, G.; GUYOT, J.-L.; DUCHARNE, A.; CIAIS, P. Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. **Environmental Research Letters**, v. 8, 014035, 2013. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014035>

GUO, C.; BENTSEN, M.; BETHKE, I.; ILICAK, M.; TJIPUTRA, J.; TONIAZZO, T.; SCHWINGER, J.; OTTERA, O. H. Description and evaluation of NorESM1-F: a fast version of the Norwegian Earth System Model (NorESM). **Geoscientific Model Development**, v. 12, p. 343-362, 2019. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-343-2019>

HAKALA, K.; ADDOR, N.; TEUTSCHBEIN, C.; VIS, M.; DAKHLAOUI, H.; SEIBERT, J., 2019. Hydrological Modeling of Climate Change Impacts, **Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society**, p. 1–20, 2019. <https://doi.org/10.1002/9781119300762.wsts0062>

HATTERMANN, F. F.; VETTER, T.; BREUER, L.; SU, B.; DAGGUPATI, P.; DONNELLY, C.; FEKETE, B.; FLÖRKE, F.; GOSLING, S. N.; HOFFMANN, P.; LIERSCH, S.; MASAKI Y.; MOTOVILOV, Y.; MÜLLER, C.; SAMANIEGO, L.; STACKE, T.; WADA, Y.; YANG, T.; KRYSNAOVA, V. Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: a cross-scale study. **Environmental Research Letters**, v. 13, 015006, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9938>

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. D.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VICENTE, A. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>

HEERSPINK, B. P.; KENDALL, A. D.; COE, M. T.; HYNDMAN, D. W. Trends in streamflow, evapotranspiration, and groundwater storage across the Amazon Basin linked to changing precipitation and land cover. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 32, 10075, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100755>

HERTIG, E.; MARAUN, D.; BARTHOLY, J.; PONGRACZ, R.; VRAC, M.; MARES, I.; GUTIÉRREZ, J. M.; WIBIG, J.; CASANUEVA, A. Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 38461-3867, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5469>

HOTELLING, H. The relations of the newer multivariate statistical methods to factor analysis. **British Journal of Mathematical Statistical Psychology**, v. 10, p. 69-79, 1957. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1957.tb00179.x>

HU, T.; WU, F.; ZHANG, X. Rainfall–runoff modeling using principal component analysis and neural network. **Nordic Hydrology**, v. 38, p. 235-248, 2007. <https://doi.org/10.2166/nh.2007.010>

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Estudos Complementares do Trecho de Vazão Reduzida da Volta Grande do Xingu – **Parecer Técnico 17/2021-COHID/CGTEF/DILIC**. Brasília, 2019.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Dados do Censo Demográfico 2010 - Índice de Desenvolvimento Humano. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/pesquisa/37/0>. Acessado em março 2019.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas 1981-2010. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/NormaisClimatologicas/1981-2010/>. Acessado em agosto 2020.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University in Press**, Cambridge, 2014.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University in Press**, Cambridge, 2021.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. AR6 Climate Change 2022: Summary for Policymakers. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University in Press**, Cambridge, 2022.

IRI - INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY. The Climate Predictability Tool. Disponível em: <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cpt/>, 2019. Acessado em agosto de 2019.

IZENMAN ALAN JULIAN. "Modern multivariate statistical techniques". Springer, 2008.

JEFFERS, J. N. R. Two case studies in the application principal component analysis. **Applied Statistics**, v. 16, p. 225-236, 1967. <https://doi.org/10.2307/2985919>

JIMENEZ, J.C.; LIBONATI, R.; PERES, L. F. Droughts over Amazonia in 2005, 2010, and 2015: A cloud cover perspective. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 227, 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00227>

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J.C.; MATTAR, C.; BARICHIVICHN, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J.A.; VAN DER SCHRIER, G. Record-breaking warming an extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, 33130, 2016. <https://doi.org/10.1038/srep33130>

JOETZJER, E.; DOUVILLE, H.; DELIRE, C.; CIAIS, P. Present-day and future Amazonian precipitation in global climate models: CMIP5 versus CMIP3. **Climate Dynamics**, v. 41, p. 2921–2936, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1644-1>

JOLLIFFE, I. T. A Note on the Use of Principal Components in Regression. **Applied Statistics**, v. 31, p. 300-303, 1982. <https://doi.org/10.2307/2348005>

KAZMI, D. H.; LI, J.; RASUL, G.; TONG, J.; ALI, G.; CHEEMA, S. B.; LIU, L.; GEMMER, M.; FISCHER, T. Statistical downscaling and future scenario generation of temperatures for Pakistan Region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 120, p. 341-350, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1176-1>

KEGGENHOFF, I. ELIZBARASHVILI, M.; AMIRI-FARAHANI, A.; KING, L. Trends in daily temperature and precipitation extremes over Georgia, 1971–2010. **Weather and Climate Extremes**, v. 4, p. 75-86, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.05.001>

KENDALL, M. G. Rank Correlation Methods. London: Charles Griffin, 120 p, 1975.

KIRSCHBAUM, M; FISCHIN, A. 1996. Climate change impacts on forests. In: Watson, R.; Zinyowera, M.C.; Moss, R.H. (Ed.). Climate change 1995: impacts, adaptation and mitigation of climate change: scientific-technical analysis. **Cambridge University Press**, Cambridge, UK, p.95-129.

KIPKOGEL, O.; MWANTHI, A. M.; MWESIGWA, J. B., ATHERU, Z. K. K.; WANZALA, M. A.; ARTAN, G. Improved Seasonal Prediction of Rainfall over East Africa for Application in Agriculture: Statistical Downscaling of CFSv2 and GFDL-FLOR. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, p. 3229-3243, 2017. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0365.1>

KUNDZEWICZ, Z. W.; KRYSANOVA, V.; BENESTAD, R. E.; HOV, O.; PINIEWSKI, M.; OTTO, I. M. Uncertainty in climate change impacts on water resources. **Environmental Science & Policy**, v. 79, p. 1-8, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>.

LANDMAN, W. A.; BARNSTON, A. G.; VOGEL, C.; SAVY, J. Use of El Niño–Southern Oscillation related seasonal precipitation predictability in developing regions for potential societal benefit. **International Journal of Climatology**, v. 39, p. 5327-5337, 2019. <https://doi.org/doi:10.1002/joc.6157>

LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1145–1159, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

LENTERS, J. D.; COOK, K.H. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 54, p. 656-678, 1997. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0656:OTOOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0656:OTOOTB>2.0.CO;2)

LIEBMANN, B.; MARENGO, J. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. **Journal of Climate**, v. 14, p. 4308-4318, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2)

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 20, p. 657-675, 2016. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2014.84539>

LIU, J.; SHANGGUAN, D.; LIU, S.; DING, Y.; WANG, S.; WANG, X., 2019. Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981-2015. **Atmospheric Research**, v. 230, 104634, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104634>.

LLOPART, M.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; ROCHA, R. P.; CUADRA, S.V. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climatic Change**, v. 125, p. 111-125, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>

LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; SOARES, L. M. Performance evaluation gridded precipitation data in the river basin Xingu. VIII Simpósio Internacional de Climatologia. Belém-PA, Brasil, 2019.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. Modelagem Hidrológica Determinística e Estocástica aplicada à Região Hidrográfica do Xingu - Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24 p. 308-322, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000300005>

LUCIO, P. S.; SILVA, F. D. S.; FORTES, L. T. G.; SANTOS, L. A. R.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; BALBINO, H. T.; SARMANHO, G. F.; LUCAS, E. W. M.; BARBOSA, T. F.; DIAS, P. L. S. Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 70-87, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100007>

LYRA, A. A.; CHOU, S. C.; SAMPAIO, G. O. Sensitivity of the Amazon biome to high resolution climate change projections. **Acta Amazonica**, v. 46, p. 175-188, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502225>

MALFATTI, M. G. L.; CARDOSO, A. O.; HAMBURGER, D. S. Modelo Empírico Linear para Previsão de Vazão de Rios na Usina Hidrelétrica de Itaipu – Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, p. 257-268, 2018. <https://doi.org/10.1590/0102-7786332005>

MAPBIOMAS, 2019. Projeto MapBiomass - Coleção da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil [versão 4.0]. Disponível em: <http://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. Acessado em agosto de 2019.

MARENGO, J. A. Characteristics and spatio-temporal variability of the Amazon River Basin Water Budget. **Climate Dynamics**, v. 24, p. 11-22, 2005. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0461-6>

MARENGO, J. A. On the hydrological cycle of the Amazon basin: a historical review and current state-of-the-art. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, p. 1-19, 2006.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, p. 83-96, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>

MARENGO, J. A.; BORMA, L. S.; RODRIGUEZ, D. A.; PINHO, P.; SOARES, W. R.; ALVES, L. M. Recent Extremes of Drought and Flooding in Amazonia: Vulnerabilities and Human Adaptation. **American Journal of Climate Change**, v. 2, p. 87-96, 2013. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.22009>

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Review: Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 1033-1050, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>

MARENGO, J. A.; SOUZA, C. M. JR; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, p. 1-21, 2018. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

MARTINS, G.; VON RANDOW, C.; SAMPAIO, G.; DOLMAN, A. J. Precipitation in the Amazon and its relationship with moisture transport and tropical Pacific and Atlantic SST from the CMIP5 simulation. **Hydrology Earth System Sciences**, v. 12, p. 671-704, 2015. <https://doi.org/10.5194/hessd-12-671-2015>

MASON, S.J., TIPPETT, M.K. Climate Predictability Tool version 15.5.10, 2017.

MENDES, C. A. B.; BELUCO, A.; CANALES, F. C. Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon. **Energy**, v. 141, p. 123-138, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.071>

MENDES, D.; MARENGO, J. A. Temporal downscaling: a comparison between artificial neural network and autocorrelation techniques over the Amazon Basin in present and future climate change scenarios. **Theoretical Applied Climatology**, v. 100, p. 413-421, 2010. <https://doi.org/doi:10.1007/s00704-009-0193-y>

MENDES, D.; MARENGO, J. A.; MESQUITA, M. S. Meteorological downscaling methods with artificial neural network models. **Atmospheric Sciences Section, AGU Newsletter**, v. 3, p. 1-9, 2009. <http://atmospheres.agu.org/pdf/Newsletters/ASnewsletterVol3No3.pdf>

- MERESA, H.K.; ROMANOWICZ, R.J. The critical role of uncertainty in projections of hydrological extremes. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, p. 4245–4258, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4245-2017>
- MILES, L.; GRAINGER, A.; PHILLIPS, O. The impact of global climate change on tropical biodiversity in Amazonia. **Global Ecology and Biogeography**, v. 13, p. 553-565, 2004.
- MOHOR, G. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; SIQUEIRA JUNIOR, J. L. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 41-59, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>
- MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, K. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VANVUUREN, D. P.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEHL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T. J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, p. 747–756, 2010. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.
- MOURÃO, C.; CHOU, S. C.; MARENGO, J. Downscaling Climate Projections over La Plata Basin. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 6, p. 1-12, 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.61001>
- MÜLLER, W.; JUNGCLAUS, J.; MAURITSEN, T.; BAEHR, J.; BITTNER, M.; BUDICH, R.; BUNZEL, F.; ESCH, M.; GHOSH, R.; HAAK, H.; ILYINA, T.; KLEINEN, T.; KORNBLUEH, L.; LI, H.; MODALI, K.; NOTZ, D.; POHLMANN, H.; ROECKNER, E.; STEMMLER, I.; TIAN, F.; MAROTZKE, J. A higher-resolution version of the Max Planck Institute Earth System Model (MPI-ESM 1.2 - HR). **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 10, p. 1383-1413, 2018. <https://doi.org/10.1029/2017MS001217>
- NASCIMENTO, M.G.; HERDIES, D.L.; SOUZA, D.O. The South American Water Balance: The Influence of Low-Level Jet, **Journal of Climate**, v. 29, p. 1429-1449, 2016. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0065.1>
- NASH, J.E.; SUTCLIFF, J. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282- 290, 1970.
- NETO, A. R.; DA PAZ, A. R.; MARENGO, J. A; CHOU, S. C. Hydrologic process and climate change in hydrographic regions of Brazil. **Journal Water Resource and Protection**, v. 8, p. 1103-1127, 2016. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>
- NETO, J. D. N.; DA MOTA, A. J.; ROQUE, R. A.; HEINRICHS-CALDAS, K.; TADEI, W. P. Analysis of the transcription of genes encoding heat shock proteins (hsp) in *Aedes aegypti* Linnaeus, 1762 (Diptera: Culicidae), maintained under climatic conditions provided by the

IPCC (Intergovernmental Panel On Climate Change) for the year 2100. **Infection, Genetics and Evolution**, v. 86, 104626, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2020.104626>

NICHOLLS, N.; MURRAY, W. Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes: Asheville, NC, USA, 3–6 June 1997 Breakout Group B: Precipitation. **Climatic Change**, v. 42, p. 23-29, 1999. <https://doi.org/10.1023/A:1005495627778>

NOBRE, C.; MARENGO, J. A. Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas. São José dos Campos, SP, 608 p, 2017.

NORTE ENERGIA. UHE Belo Monte, a maior usina hidrelétrica 100% brasileira. Brasília. Disponível em: <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/a-usina>. 2018. Acessado em março 2020.

OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. M. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 77-90, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

O'NEILL, B. C., TEBALDI, C., VAN VUUREN, D. P., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., KNUTTI, R., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J.-F., LOWE, J., MEEHL, G. A., MOSS, R., RIAHI, K., SANDERSON, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, **Geoscientific Model Development**, v. 9, p. 3461–3482, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>

OTTO, M. Chemometrics. Weinheim: Wiley, 328 p., 1999.

OYEBANDE, L. Water Problems in Africa - How Can Sciences Help? **Hydrological Sciences Journal**, v. 46, p. 947-961, 2001. <https://doi.org/10.1080/02626660109492888>

PANERO, F. S. Quimiometria - Regressão por Componentes Principais. 2010. Disponível em: <http://quimiometria.pbworks.com/w/page/23745622/Quimiometria>. Acessado em 05 de agosto de 2020.

PANISSET, J. S.; LIBONATI, R.; GOUVEIA, C. M. P.; MACHADO-SILVA, F.; FRANÇA, D. A.; FRANÇA, J. R. A.; PERES, L. F. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. **International Journal of Climatology**, v. 38, p. 1096-1104, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5224>

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H.; DOS SANTOS, C. A. C. Evaluation of the Performance of SM2RAIN-Derived Rainfall Products over Brazil. **Remote Sensing**, v. 11, 1113, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11091113>

PETTITT, A. N. A non-parametric approach to the change point problem. **Applied Statistics**, v. 28, p. 126-135, 1979.

POHLERT, T., 2020. Trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection (R package version 1.1.2). Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=trend>

QUADRO, M. F. L.; SILVA DIAS, M. A. F.; HERDIES, D. L.; DE GONCALVES, L. G. G. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 27, p.152-162, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200004>

RAGAB, R.; BROMLEY, J. IHMS - Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. Hydrological processes and general structure. **Hydrological Process**, v. 24, p. 2663–2680, 2010. <https://doi.org/10.1002/hyp.7681>

RAMÍREZ, M. C. V.; FERREIRA, N. J.; VELHO, H. F. C. Linear and nonlinear statistical downscaling for rainfall forecasting over Southeastern Brazil. **Weather and Forecasting**, v. 21, p. 969-989, 2006. <https://doi.org/10.1175/WAF981.1>

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>

REMESAN, R.; SHAMIM, M. A.; HAN, D.; JIMSON, M. Runoff prediction using an integrated hybrid modelling scheme. **Journal of Hydrology**, v. 372, p. 48-60, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.034>

REMESAN, R.; BRAY, M.; J. MATHEW. J. Application of PCA and Clustering Methods in Input Selection of Hybrid Runoff Models. **Journal of Environmental Informatics**, v. 31, p. 137-152, 2018. <https://doi.org/10.3808/jei.201700378>

RENCHER, A. C. Methods of multivariate analysis. 2nd ed. Brigham Young University-USA. Wiley Interscience publication, 737p, 2002.

ROLIM, P.; SANTOS, D.; ROCHA, E. Variabilidade da precipitação na Amazônia: implicações socioeconômicas. XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis/SC, Brasil, 2006.

SADDIQUE, N.; BERNHOFER, C.; KRONENBERG, R.; USMAN, M. Downscaling of CMIP5 Models Output by Using Statistical Models in a Data Scarce Mountain Environment (Mangla Dam Watershed), Northern Pakistan. **Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences**, v. 55, p. 719-735, 2019. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00111-2>

SALAS-MÉLIA, D.; F. CHAUVIN; M. DÉQUÉ; H. DOUVILLE; J. F. GUEREMY; F. CHAUVIN; S. PLANTON; ROYER, J. F.; S. TYTECA, S. Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. CNRM Technical Report, 103p, 2005.

SALVADOR, M. A.; BRITO, J. I. B. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, p. 253-261, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGINO, G. Q. Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, p. 64-73, 2016. <https://doi.org/10.1590/0102-778620150003>

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SANTOS E SILVA, C. M. Trend analysis of daily precipitation in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p; 1041-1052, 2015. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150052>

SANTOS, E. B.; LUCIO, P. S.; SANTOS E SILVA, C. M. 2017. Synoptic patterns of atmospheric circulation associated with intense precipitation events over the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, p. 343-358. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1712-7>

SATHLER, D.; MONTE-MÓR, R. L.; CARVALHO, J. A. M. D.; COSTA, A. Urban hierarchy in the Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 27, p. 251-268, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-30982010000200002>

SATYAMURTY, P., CASTRO, A. A., TOTA, J., SILVA GULARTE, L. E., MANZI, A. O. Rainfall trends in the Brazilian Amazon basin in the past eight decades. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 139-148, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0133-x>

SCHWARTZMAN, S.; VILAS-BOAS, A.; ONO, K. Y.; FONSECA, M. G.; DOBLAS, J.; ZIMMERMAN, B.; JUNQUEIRA, P.; JEROZOLIMSKI, A.; SALAZAR, M.; JUNQUEIRA, R. P.; TORRES, M. The natural and social history of the indigenous lands and protected areas corridor of the Xingu River basin. **Philosophical Transactions**, v. 368, 20120164, 2013. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0164>

SERRÃO, E. A. O.; SILVA, M. T.; FERREIRA, T. R.; DE ATAIDE, L. C. P.; WANZELER, R. T. S.; DA SILVA, V. P. R.; DE LIMA, A. M. M.; DE SOUSA, F. A. S. Large-Scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. **Ecohydrology & Hydrobiology**, v. 21, p. 23-35, 2021.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. 1965. An analysis of variance test for normality (complete sample). **Biometrika**, v. 52, p. 591-611. <https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591>

SHRESTHA, B.; COCHRANE, T. A.; CARUSO, B. S.; ARIAS, M. E.; PIMAN, T. Uncertainty in flow and sediment projections due to future climate scenarios for the 3S Rivers in the Mekong Basin. **Journal of Hydrology**, 540, pp.1088-1104, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.07.019>

SILVA, F. D. S. Cenários climáticos atuais e futuros da produtividade do algodão herbáceo no nordeste do Brasil. Campina Grande-PB, 105 p. **Tese (Doutorado em Meteorologia)** – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, v. 129, p. 117-129, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>

SKANSI, M. M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J. A. A.; BENTANCUR, O. J.; GEIER, Y. R. C.; AMAYA, R. L. C.; JÁCOME, H.; RAMOS, A. M.; ROJAS, C. O.; PASTEN, A. M.; MITRO, S. S.; JIMÉNEZ, C. V.; MARTINEZ, R.;

ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global and Planetary Change**, v. 100, p. 295-307, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>

STICKLER, C. M.; COE, M. T.; COSTA, M. H.; NEPSTAD, D. C.; MCGRATH, D. G.; DIAS, L. C. P.; RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S. 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. **PNAS**, v. 4, p. 9601-9609. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, p. 485–498, 2012. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: A basic review. **Journal of Diagnostic Medical Sonography**, v. 6, p. 35-39, 1990.

TODINI, E. Hydrological Catchment Modelling: Past, Present and Future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 468-482, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-468-2007>

TOMASELLA, J., BORMA, L. S.; MARENGO, A.; RODRIGUEZ, D. A.; CUARTAS, L. A.; NOBRE, C. A.; PRADO, M. C. R. The droughts of 1996–1997 and 2004-2005 in Amazonia: Hydrological response in the river main- stem. **Hydrological Processes**, v. 25, p. 1228-1242, 2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.7889>

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**, UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia - Ciência e Aplicação**, UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 2012.

VAN VURREN, K. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M. RIAHI, K.; THOMSOM, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G. C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.-L.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S. J.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. **Climate change**, v. 109, p. 5-31, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

VIEIRA, S. O.; SATYAMURTY, P.; ANDREOLI, R. V. On the south Atlantic convergence Zone affecting southern Amazonia in austral summer. **Atmospheric Science Letters**, v. 14, p. 1-6, 2013. <https://doi.org/10.1002/asl2.401>

VILLAR, J. C. E., GUYOT, J. L., RONCHAIL, J., COCHONNEAU, G., FILIZOLA, N. P., FRAIZY, P., LABAT, D., OLIVEIRA, E., ORDOÑEZ GÁLVEZ, J. J., VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin (1974–2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, p. 297-311, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>

VILLAS-BÔAS, A. De olho na Bacia do Xingu. Série Cartô Brasil Socioambiental. ISA, Volume 5, São Paulo, 2012.

VOLDOIRE, A.; SANCHEZ-GOMEZ, E.; SALAS Y MÉLIA, D.; DECHARME, B.; CASSOU, C.; S. SÉNÉSI, S.; VALCKE, S.; BEAU, I.; ALIAS, A.; CHEVALLIER, M.;

DÉQUÉ, M.; DESHAYES, J.; DOUVILLE, H.; FERNANDEZ, E.; MADEC, G.; MAISONNAVE, E.; MOINE, M. P.; PLANTON, S.; SAINT-MARTIN, D.; SZOPA, S.; TYTECA, S.; ALKAMA, R.; BELAMARI, S.; BRAUN, A.; COQUART, L.; CHAUVIN, F. The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, **Climate Dynamics**, v. 40, p. 2091-2121, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>

VON RANDOW, R. C. S.; RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J.; A. P. D.; BART KRUIJT, B.; KABAT, P. Response of the river discharge in the Tocantins River Basin, Brazil, to environmental changes and the associated effects on the energy potential. **Regional Environmental Change**, v. 19, p. 193-204, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1396-5>

XAVIER, A. C., KING, C. W., SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical Research Letters**, v. 38, p. 1–4, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL046824>

WAGENER, T.; WHEATER, H. S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 320, p. 132–154, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.015>

WILBY, R. L.; CHARLES, S. P.; ZORITA, E.; TIMBAL, B.; WHETTON, P.; MEARNES, L. O. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Disponível em: http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf, 2004.

WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. 2. ed. Philadelphia: Elsevier Academic Press Publications, 2006.

WOLDEMESKEL, F. M.; SHARMA, A.; SIVAKUMAR, B.; MEHROTRA, R. An error estimation method for precipitation and temperature projections for future climates. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 117, D22, 2012, <https://doi.org/10.1029/2012JD018062>

YAN, G.; QI, F.; WEI, L.; AIGANG, L.; YU, W.; JING, Y.; AIFANG, C.; YAMIN, W.; YUBO, S.; QIANQIAN, M. Changes of daily climate extremes in Loess Plateau during 1960–2013. **Quaternary International**, v. 371, p. 5-21. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.08.052>

YIN, L., FU, R.; SHEVLIAKOVA, E.; DICKSON, R. E. How well can CMIP5 simulate precipitation and its controlling processes over tropical South America? **Climate Dynamics**, v. 41, p. 3127-3143, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1582-y>

ZEBASE, S.; JAIN, S.; SALUNKE, P.; SHAFIQ, S.; MISHKA, S. K. Assessment of CMIP5 multimodel mean for the historical climate of Africa. **Atmospheric Science Letters**, v. 20, 8, 2019. <https://doi.org/10.1002/asl.926>

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIRES, F. W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, 2, p. 851-870, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

ZHANG, X.; YANG, F. RCLimDex (1.0) User Manual. Climate Research Branch, Environment Canada, Ontario, 22 p., 2004.

ZORITA, E; STORCH, H. V. The analog method as a simple Statistical Downscaling Technique: comparison with more complicated methods. **Journal of Climate**, v. 12, p. 2474-2489, 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2)

ANEXOS

Tabela A1. Dados Energéticos do CHBM (EPE, 2010).

DADOS ENERGÉTICOS	
CASA DE FORÇA PRINCIPAL - BELO MONTE	
Potência Total	11.000 MW
Número de máquinas turbinas Francis	18
Rendimento médio do conjunto turbina-gerador (%)	91,8
Taxa de indisponibilidade forçada – TEIF	2,917
Indisponibilidade programada – IP (%)	0
Queda bruta (m)	91,26
Queda líquida de referência (m)	87,6
Perda no circuito hidráulico (m)	2,06
Vazão unitária nominal	775 m ³ .s ⁻¹
CASA DE FORÇA COMPLEMENTAR – PIMENTAL	
Potência Total	233,1 MW
Número de máquinas turbinas Bulbo	6
Rendimento médio do conjunto turbina-gerador (%)	89,4
Taxa de indisponibilidade forçada – TEIF	1,672
Indisponibilidade programada – IP (%)	5,403
Queda bruta (m)	13,32
Queda líquida de referência (m)	10,8
Perda no circuito hidráulico (m)	0,15
Vazão unitária nominal	411 m ³ .s ⁻¹

Tabela elaborada pelo autor (2020).

Tabela A2. Informações referentes as estações fluviométricas disponíveis na BHX.

ESTAÇÃO	CODIGO	MUNICÍPIO	UF	LAT (°)	LONG (°)	RIO	ÁREA	PERÍODO	% FALHA
ALTAMIRA*	18850000	Altamira	PA	-3,21	-52,21	Xingu	448.000	1980-2014	1,2
PEDRA DO Ó	18700000	Altamira	PA	-4,53	-54,01	Iriri	122.000	1980-2009	2,8
CAJUEIRO	18650000	Altamira	PA	-5,65	-54,52	Curuá	35.600	1980-2006	0,0
BOA ESPERANÇA	18500000	São Felix do Xingu	PA	-6,75	-51,77	Fresco	42.400	1980-2009	2,2
JUSANTE RIO PRETO	18436000	Vila Rica	MT	-10,05	-52,11	Comandante Fontoura	12.000	1980-2009	3,1
CONSUL	18423000	Feliz Natal	MT	-12,37	-54,49	Van den Steinen	8.900	1980-2008	0,3
FAZENDA IGUAÇU	18420000	Paranatinga	MT	-13,14	-54,45	Rio Ronuro	3.840	1980-2008	0,0
POUSADA MATRINXA	18415000	Canarana	MT	-13,57	-53,08	Culuene	11.600	1980-2008	3,2

* Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão e avaliação de cenários futuros.

Tabela A3. Informações referentes as estações meteorológicas do INMET, utilizadas no DE na Amazonia.

ESTAÇÃO	UF	CODIGO	LAT (°)	LONG (°)	ALT (m)	ESTAÇÃO	UF	CODIGO	LAT (°)	LONG (°)	ALT (m)
Altamira*	PA	82353	-3,2	-51,2	74,0	Manaus	AM	82331	-3,1	-60,0	67,0
Araguaína	TO	82659	-7,2	-48,2	228,5	Manicoré	AM	82533	-5,8	-61,3	50,0
Barcelos	AM	82113	-1,0	-62,9	40,0	Marabá	PA	82562	-5,4	-49,1	95,0
Belém	PA	82191	-1,4	-48,4	10,0	Monte Alegre	PA	82181	-2,0	-54,1	145,9
Belterra	PA	82246	-2,6	-55,0	175,7	Óbidos	PA	82178	-1,9	-55,5	37,0
Benjamin Constant	AM	82410	-4,4	-70,0	65,0	Palmas	TO	83033	-10,2	-48,3	280,0
Boa Vista	RR	82024	2,8	-60,7	90,0	Parintins	AM	82240	-2,6	-56,7	29,0
Breves	PA	82188	-1,7	-50,5	14,7	Pedro Afonso	TO	82863	-9,0	-48,2	187,0
Cametá	PA	82263	-2,3	-49,5	23,9	Peixe	TO	83228	-12,0	-48,5	242,5
Caracarái	RR	82042	1,8	-61,1	94,1	Porto de Moz	PA	82184	-1,7	-52,2	15,9
Coari	AM	82425	-4,1	-63,1	46,0	Porto Nacional	TO	83064	-10,7	-48,4	239,2
Codajás	AM	82326	-3,8	-62,1	48,0	Porto Velho	RO	82825	-8,8	-63,9	95,0
Conc. do Araguaia	PA	82861	-8,3	-49,3	156,9	Rio Branco	AC	82915	-10,0	-67,8	160,0
Cruzeiro do Sul	AC	82704	-7,6	-72,7	170,0	São Félix do Xingu	PA	82668	-6,63	-51,97	206
Eirunepé	AM	82610	-6,7	-69,9	104,0	São G. da Cachoeira	AM	82106	-0,1	-67,1	90,0
Fonte Boa	AM	82212	-2,5	-66,2	55,6	Soure	PA	82141	-0,7	-48,5	10,5
Iauaretê	AM	82067	0,6	-69,2	120,0	Taguatinga	TO	83235	-12,4	-46,4	603,6
Itacoatiara	AM	82336	-3,1	-58,4	40,0	Tarauacá	AC	82807	-8,2	-70,8	190,0
Itaituba	PA	82445	-4,3	-56,0	45,0	Tefé	AM	82317	-3,8	-64,7	47,0
Lábrea	AM	82723	-7,3	-64,8	61,0	Tracuateua	PA	82145	-1,1	-46,9	36,0
Macapá	AP	82098	-0,1	-51,1	14,5	Tucuruí	PA	82361	-3,8	-49,7	40,0

* Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão e avaliação de cenários futuros.

APÊNDICES

APÊNDICE A - FORMULAÇÃO DOS ÍNDICES DE EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

a. **Rx1day (Máximo de precipitação em um dia)**

Seja RR_{ij} o total diário de precipitação em um dia *i* e em um período *j*. Então, os valores máximos de precipitação de 1 dia para o período *j* são:

$$R_{x1day\ j} = \text{Max} (RR_{ij}) \quad (18)$$

b. **Rx5day (Máximo de precipitação em 5 dias consecutivos)**

Seja RR_{kj} a quantidade diária de precipitação para o intervalo de cinco dias consecutivos terminando em *k* no período *j*. Então, os valores máximos para o período *j* são:

$$R_{x5day\ j} = \text{Max} (RR_{kj}) \quad (19)$$

c. **R1mm (Número de dias com precipitação intensa acima de 1 mm)**

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação no dia *i* no período *j*. Contar o número de dias em que:

$$RR_{ij} \geq 1 \text{ mm} \quad (20)$$

d. **R10mm (Número de dias com precipitação intensa acima de 10 mm)**

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação no dia *i* no período *j*. Contar o número de dias em que:

$$RR_{ij} \geq 10 \text{ mm} \quad (21)$$

e. **R20 (Número de dias com precipitação intensa acima de 50 mm)**

Este índice se refere ao número de dias com chuvas superiores ao um valor denominado de *nn*, este trabalho utilizou-se 20 mm, ou seja, o número de dias no ano com chuvas superiores a 20 mm/dia. Calculado da seguinte forma. Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação em

um dia i e em um período j . O índice R_{nnmm} indica o número de dias com precipitação intensa anual quando:

$$RR_{ij} \geq 20\text{mm} \quad (22)$$

f. SDII (Índice simples de intensidade diária)

Seja RR_{wj} a quantidade diária de precipitação em dias chuvosos, w ($RR \geq 1\text{mm}$) em um período j . Se W representa o número de dias chuvosos em j , então:

$$SDII = \frac{\sum_{w=1}^W RR_{wj}}{W} \quad (23)$$

g. CDD (Dias consecutivos secos)

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação em um dia i em um período j . O índice CDD indica o número máximo de dias consecutivos secos quando, ou seja, o maior número de dias consecutivos no período j em que:

$$RR_{ij} < 1\text{mm} \quad (24)$$

h. CWD (Dias consecutivos chuvosos)

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação em um dia i em um período j . O índice CWD indica o maior número de dias consecutivos no período j em que:

$$RR_{ij} \geq 1,0\text{mm} \quad (25)$$

i. R95p (Dias úmidos quando precipitação > percentil 95)

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação em um dia i em um período j . O índice R95p indica o percentil 95 de precipitação em dias úmidos no período j em que:

$$R95p = \sum_{i=l}^l RR_{ij} \quad (26)$$

j. R99p (Dias úmidos quando precipitação > percentil 99)

Seja RR_{ij} a quantidade diária de precipitação em um dia i em um período j . O índice $R99p$ indica o percentil 99 de precipitação em dias úmidos no período j em que:

$$R99p = \sum_{i=1}^l RR_{ij} \quad (27)$$

k. PRCPTOT (Precipitação total anual)

PRCPTOT é o total de precipitação acumulado em um ano, dada por:

$$PRCPTOT = \sum_{i=1}^l RR_{ij} \quad (28)$$

em que l é igual a 365 para anos não bissexto e igual a 366 para ano bissexto.

APÊNDICE B - ARTIGOS CIENTÍFICOS

B1 - Artigo publicado na Revista Brasileira de Meteorologia

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; ROCHA-JÚNIOR, R. L.; ATAÍDE, K. R. P. Previsões de vazões mensais na bacia hidrográfica do Xingu – Leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 1045-1056, 2020. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863550012>

B2 - Artigo publicado na Weather and Climate Extremes

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; ROCHA-JÚNIOR, R. L.; PINTO, D. D. C.; DA SILVA, V. P. R. Trends in climate extreme assessed in the Xingu river basin – Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, v. 31, 10036, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>

Artigo

Previsões de Vazões Mensais na Bacia Hidrográfica do Xingu - Leste da Amazônia

Edmundo Wallace Monteiro Lucas^{1,2} , Francisco de Assis Salviano de Sousa¹ ,
Fabrício Daniel dos Santos Silva³ , Rodrigo Lins da Rocha Júnior³ ,
Kleber Renato da Paixão Ataíde² 

¹*Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

²*Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, DF, Brasil.*

³*Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, Brasil.*

Recebido em: 29 de Junho de 2020 - Aceito em: 1 de Setembro de 2020

Resumo

Modelos empíricos chuva-vazão vêm sendo cada vez mais usados nas últimas décadas, devido a indisponibilidade de dados de entrada dos modelos conceituais, e à confiabilidade, rapidez, e menor complexidade destes modelos. Neste contexto, foi aplicada a técnica de Regressão por Componentes Principais (RCP) na simulação das vazões médias mensais de oito estações fluviométricas na Bacia Hidrográfica do Xingu (BHX), pertencente a grande bacia hidrográfica amazônica. Na BHX se encontra a usina hidroelétrica de Belo Monte, além de importantes áreas de preservação ambiental. Demonstra-se na pesquisa o grau de relação entre a precipitação e vazão, entrada e resposta do modelo chuva-vazão baseado em RCP, e os respectivos graus de defasagem com eficiência preditiva. A RCP apresentou bons resultados na simulação das vazões mensais em todas as estações selecionadas, caracterizando bem a dinâmica das séries temporais com resultados ótimos nos períodos de estiagem (maio a outubro) e tendência a leve subestimativa nos períodos chuvosos (novembro a abril). Tais resultados utilizando a precipitação observada na simulação das vazões da BHX permitem concluir que um bom sistema de previsão climática para a precipitação sazonal poderá inferir um grau preditivo importante para as vazões com até três meses de antecedência.

Palavras-chave: dinâmica do clima, modelo chuva-vazão, regressão por componentes principais.

Monthly Streamflow Forecast in the Xingu River Basin - Eastern Amazon

Abstract

Empirical rainfall-streamflow models have been increasingly used in recent decades, due to the unavailability of input data from conceptual models, and the reliability, speed, and less complexity of these models. In this context, the Principal Component Regression technique (PCR) to simulate the monthly average streamflow of eight river stations in the Xingu River Basin (XRB) was applied, which belongs to the large Amazon basin. The XRB has the Belo Monte hydroelectric plant, as well as important areas of environmental preservation. The degree of relationship between rainfall and streamflow, input and response of the rainfall-streamflow model based on PCR is shown in the research and the respective degrees of lag with predictive efficiency. The PCR showed good results in the simulation of the monthly streamflow in all the selected stations, characterizing well the dynamics of the time series with excellent results in the dry periods (May to October) and a tendency to slightly underestimate in the rainy periods (November to April). These results, using the rainfall observed for streamflow simulation in the XRB, allow us to conclude that a good climate forecasting system for seasonal rainfall can infer an important predictive degree for streamflow up to three months in advance.

Keywords: climate dynamics, rainfall-streamflow model, principal component regression.

1. Introdução

Os modelos hidrológicos chuva-vazão (conceituais ou empíricos) procuram representar a parte terrestre do ciclo hidrológico, transformando a precipitação que cai sobre a bacia em vazão no rio (Almeida e Serra, 2017). Estes modelos são amplamente utilizados para extrapolar séries temporais de vazões no tempo e no espaço para aplicações operacionais e científicas, tais modelos permitem estender os registros de vazões disponíveis sendo possível prever o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas para diferentes aplicações e cenários climáticos (Wagner e Whater, 2006).

Em geral os modelos hidrológicos aplicados levam em conta a relação entre as variáveis, sendo classificados em empíricos ou conceituais. Os modelos empíricos capturam relações entre a variável preditora e a variável observada, sem necessariamente representar o comportamento físico dos processos envolvidos, que são geralmente representados pelos modelos conceituais (Tucci, 2005; Todini, 2007; Devi *et al.*, 2015).

Há um universo de possibilidades na utilização de modelos empíricos como: regressões múltiplas, redes neurais, modelos auto-regressivos com médias móveis (ARMA e ARIMA), análises de componentes principais (Malfatti *et al.*, 2018). Estes modelos levam alguma vantagem na aplicação em relação aos modelos conceituais, pois em geral, utilizam um número menor de dados de entrada na modelagem sendo de fácil ajuste e validação. Muitos estudos foram aplicados com estes modelos nas simulações de vazões em bacias hidrográficas (Hu *et al.*, 2007; Remesan *et al.*, 2009; Alexandre, 2012; Malfatti *et al.*, 2014; Filho e Lall, 2014; Remesan *et al.*, 2018; Malfatti *et al.*, 2018).

Na técnica de regressão por Análises de Componentes Principais, em vez de regressar diretamente a variável dependente na variável explicativa, as componentes principais da variável explicativa são usados como regressores, ortogonalizando o problema da regressão e tornando os cálculos mais fáceis e estáveis (Jolliffe, 1982). Alguns trabalhos vêm utilizando modelos hidrológicos com a técnica de Análise de Componentes Principais nas simulações de vazões (Hu *et al.*, 2007; Duan *et al.*, 2010; Remesan *et al.*, 2018).

Duan *et al.* (2010), desenvolveram um modelo de regressão regional para a bacia do Rio Hailar na China correlacionado o escoamento anual com dados de precipitação, evaporação e outras características da bacia para o período de 1956 a 2006. Essa bacia é a principal fonte de água para indústria e agricultura local. Na elaboração dos resultados foi utilizado a técnica de regressão por análises de componentes principais, os resultados mostraram que o modelo se mostrou robusto, pois os escoamentos previstos são compatíveis com os correspondentes observados apresentando uma correlação satisfatória. Esta técnica, pode

ajudar a resolver problemas de multicolinearidade na correlação entre o escoamento e as características da bacia durante as simulações hidrológicas.

A aplicação de modelagem hidrológica chuva-vazão por meio de técnicas estatísticas (modelos empíricos) vem crescendo nas últimas décadas, principalmente pela indisponibilidade de alguns dados de entrada dos modelos conceituais, a necessidade de previsões menos complexas, mais rápidas e confiáveis. As bacias hidrográficas localizadas na Amazônia são particularmente adequadas para a aplicação de modelos hidrológicos chuva-vazão pois a precipitação e a vazão são altamente correlacionadas nestas bacias.

A precipitação é a variável meteorológica que mais influencia o fluxo dos rios, portanto, mudanças nos padrões da precipitação podem impactar as atividades socioeconômicas da região como agricultura, navegação e a geração de energia elétrica. Porém, esses impactos também variam de acordo com outras características da bacia como o tipo de vegetação e o uso e cobertura do solo (Coe *et al.*, 2009; Dias *et al.*, 2018).

A Bacia Hidrográfica do Xingu (BHX) está localizada na Amazônia Brasileira e abriga hoje um dos maiores projetos do governo brasileiro em termos de produção de energia, o Complexo Hidrelétrico de Belo Monte o maior empreendimento energético 100% brasileiro. A hidroelétrica de Belo Monte tem capacidade potencial instalada de produzir 11.233 MW, isto representa quase 10% da demanda brasileira de energia elétrica (Stickler *et al.*, 2013; De Menezes, 2017; Norte Energia, 2018). Além do potencial para geração de energia hidrelétrica, a BHX também tem extrema importância ambiental e cultural, por conter além da floresta amazônica, porções consideráveis do cerrado, unidades de conservação florestal e de povos indígenas (Villas-Boas, 2012).

O objetivo deste trabalho é aplicar a modelagem hidrológica chuva-vazão na simulação da vazão mensal nas estações fluviométricas da bacia Hidrográfica do Xingu no Leste da Amazônia Brasileira, utilizando a técnica de Regressão por Componentes Principais. Os resultados desta pesquisa buscam contribuir significativamente com previsões hidrológicas mensais mais rápidas e confiáveis e apresentar a metodologia como uma ferramenta útil e operacional, para auxiliar e apoiar a tomada de decisões em setores-chave, como gerenciamento de grandes projetos hidráulicos (geração de energia hidrelétrica) e no planejamento dos usos múltiplos dos recursos hídricos na BHX.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A BHX (Fig. 1) importante sub-bacia da Bacia Amazônica localizada nos Estados do Pará e Mato Grosso, possui uma área de drenagem de aproximadamente

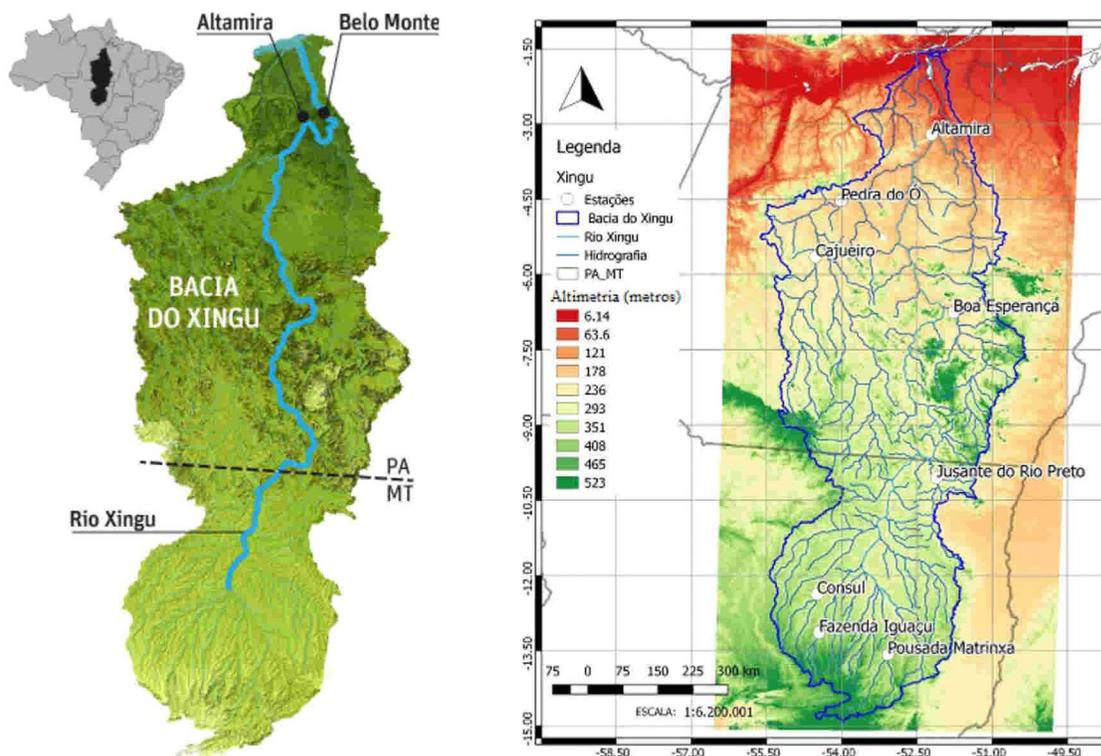


Figura 1 - Localização geográfica da Bacia do Xingu e das estações fluviométricas da ANA.

510.000 km². O rio principal Xingu, nasce em Mato Grosso no encontro das Serras Formosa e Roncador no cerrado brasileiro e se uni ao bioma amazônico percorrendo uma extensão de aproximadamente 2.600 km (Silva *et al.*, 2013). A BHX está dividida basicamente em três regiões: Alto Xingu, Médio Xingu e Baixo Xingu. Os principais afluentes do rio Xingu são os rios Culuene, Fresco, Curuá, Iriri e Bacajá (CPRM, 2019).

A variabilidade temporal e espacial da precipitação na BHX apresenta um regime um pouco diferenciado entre as partes norte e sul da bacia. De um modo geral os maiores volumes de precipitação ocorrem entre novembro a abril e o período de estiagem entre maio e outubro. Na parte sul e centro da bacia os maiores volumes de precipitação são observados nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, oriundos da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Já na parte norte os maiores volumes de precipitação são observados nos meses de janeiro, fevereiro e março, nesse período a parte norte da BHX está sobre influência da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT, principal sistema meteorológico precipitante na Amazônia (Reboita *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2016).

2.2. Dados utilizados

Foram selecionadas para este trabalho estações fluviométricas com dados consistidos de vazões médias

mensais no período de 1980 a 2016 localizadas na BHX (Fig. 1). As estações foram selecionadas a partir do Inventário de Estações Fluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2019) e extraídos dados com o software HidroWeb (versão 3.1.1). Informações como município, coordenadas geográficas, rio, área drenada e período de dados das estações selecionadas estão descritas na Tabela 1. A estação fluviométrica de Altamira no rio principal Xingu, no exutório da BHX (montante do Reservatório de Belo Monte), será usada como referência na validação dos resultados das simulações das vazões mensais.

Foram utilizados dados diários de precipitação das análises gradeadas disponibilizados por Xavier *et al.* (2016), no período de 1980 a 2016. Estes dados fazem parte de um projeto conjunto entre a Universidade do Texas (USA) e Universidade Federal do Espírito Santo (Brasil), estão disponíveis em uma grade com resolução espacial de 0,25° × 0,25° para todo o território brasileiro. Com intuito de comparar e apresentar os resultados do trabalho, foram utilizados ainda totais mensais de precipitação observados na estação meteorológica do INMET em Altamira.

2.3. Regressão por Componentes Principais

A Regressão por Componentes Principais (RCP), foi inicialmente proposta por Kendall (1975) e Hotelling (1975). Essa técnica de regressão está baseada em Aná-

Tabela 1 - Informações adicionais referentes as estações fluviométricas na BHX.

Estação	Município	UF	Lat (°)	Long (°)	Rio	Área (km ²)	Período
Altamira*	Altamira	PA	-3,21	-52,21	Xingu	448.000	1980-2014
Pedra do Ó	Altamira	PA	-4,53	-54,01	Iriri	122.000	1980-2014
Cajueiro	Altamira	PA	-5,65	-54,52	Curuá	35.600	1980-2016
Boa Esperança	São Felix do Xingu	PA	-6,75	-51,77	Fresco	42.400	1980-2016
Jusante do Rio Preto	Vila Rica	MT	-10,05	-52,11	Comandante Fontoura	12.000	1980-2014
Consul	Feliz Natal	MT	-12,37	-54,49	Van den Steinen	8.900	1980-2014
Fazenda Itaguaçu	Paranatinga	MT	-13,14	-54,45	Rio Ronuro	3.840	1980-2016
Pousada Matrinxa	Canarana	MT	-13,57	-53,08	Culuene	11.600	1980-2016

*Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

lises de Componentes Principais (ACP), no intuito de contornar dificuldades encontradas na Regressão Linear Múltipla (RLM), ou seja, eliminando problemas de multicolinearidade das variáveis, e também reduzindo a quantidade de ruído inserido no modelo. A RCP é frequentemente aplicada como método de redução de dimensionalidade sem acarretar perdas significativas de informações que estão contidas nos dados (Otto, 1999).

Na técnica de RCP em vez de regredir diretamente a variável dependente na variável explicativa, as componentes principais da variável explicativa são usados como regressores. Frequentemente, as componentes principais com altas variâncias (aquelas baseadas em autovetores correspondentes aos autovalores da matriz de variância-covariância da amostra das variáveis explicativas) são selecionados como regressores. No entanto, as componentes principais com baixas variações também podem ser importantes na regressão.

O detalhamento matemático sobre a aplicação desta técnica de análise estatística multivariada está descrita em Bishop (2006) e Izenman (2008). As premissas da técnica de regressão por componentes principais são as mesmas usadas na regressão linear múltipla, como: linearidade, variação constante e independência. Como a regressão por componentes principais não fornece limites de confiança, a normalidade não precisa ser assumida.

Os modelos aplicados de RCP podem ser escritos seguindo uma notação usual (Eq. (1)), suponha que a equação de regressão possa ser escrita em forma de matriz como:

$$Y = XB + r \quad (1)$$

onde (Y) é a variável dependente, (X) representa a variável independente, (B) é o coeficiente de regressão a ser estimado e (r) representa o erro ou resíduo.

2.4. Ferramenta de previsibilidade

Nesta pesquisa foi utilizado o software Climate Predictability Tool (CPT), versão 15.6.3 na Regressão por Componentes Principais para simulações de vazões mé-

dias mensais na BHX. Diversos trabalhos foram desenvolvidos aplicando esta ferramenta de previsão climática, muito utilizada nos Serviços Meteorológico Nacionais e Instituições de Pesquisa (Lucio *et al.*, 2010; Kipkoge *et al.*, 2017; Esquivel *et al.*, 2018; Landman *et al.*, 2019).

A Ferramenta CPT é um software desenvolvido pelo International Research Institute for Climate and Society - IRI (Columbia University), voltado para construção de modelos de previsão climática sazonal, simulações e validações de modelos com diferentes dados atualizados. Embora a ferramenta seja especificamente projetada para essas aplicações, ela pode ser usada em configurações mais gerais com qualquer dado de entrada utilizando basicamente três métodos de simulação: Análise de Correlação Canônica, Regressão de Componentes Principais ou Regressão Linear Múltipla para qualquer aplicação (IRI, 2019; Mason e Tippett, 2017).

O CPT utiliza dois conjuntos de dados nas simulações. O primeiro conjunto de dados contém as “variáveis X”, chamadas de “preditores”, “variáveis independentes” ou “variáveis explicativas”. Essas variáveis X são usadas para prever as variáveis no segundo conjunto de dados, que deve conter as “variáveis Y”, que são chamadas de “preditandos”, “variáveis dependentes” ou “variáveis de resposta”. Neste trabalho foram utilizados os dados mensais de chuva como variáveis explicativa e as vazões mensais como variáveis de resposta.

A variável preditora (precipitação mensal) usada para prever a vazão mensal, foi obtida dos dados em grade selecionados na BHX, no período de 1980 a 2016 (Xavier *et al.*, 2016). Essa base de dados em grade com resolução espacial de 0,25° x 0,25° (Xavier *et al.*, 2016), vem sendo amplamente utilizada para o Brasil como fonte de informações meteorológicas para pesquisas e aplicações diversas (Da Silva *et al.*, 2018; Da Silva *et al.*, 2019; Paredes-Trejo *et al.*, 2019). Para tanto, foi necessário definir o número mínimo e máximo de modos da RCP, sendo estes limitados aos mesmos valores de números mínimos e máximos das FOE (Funções Ortogonais Empíricas) das variáveis preditora (precipitação) e resposta (vazão). Na prática, o CPT tem apresentado melhores resultados com a

seleção máxima de 10 modos para RCP e FOE (Lucio *et al.*, 2010), essa orientação foi seguida neste trabalho. Durante a simulação a ferramenta determina o número ótimo dos modos acima para cada simulação mensal.

2.5. Avaliadores de desempenho

Para avaliar o desempenho da aplicação da técnica de RCP nas simulações das vazões mensais na BHX,

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (2)$$

onde (x) e (y) são as variáveis padronizadas a serem correlacionadas. O valor do (CC) varia entre $-1 \leq r \leq 1$. Quando r tende ao valor 1, significa uma correlação perfeita positiva entre as duas variáveis, para r próximo a -1 há uma correlação negativa perfeita entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui e $r = 0$ indica que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra.

A interpretação do coeficiente de correlação pode ser feita através de faixas, contudo, deve ser conhecer a natureza dos dados, tamanho da amostra e a relação entre as variáveis (Taylor, 1990). Em geral as faixas guias indicam correlação moderada para valores de r acima de 0,5; forte para valores acima de 0,7 e muito forte para valores acima de 0,9. Correlações fracas apresentam valores de CC abaixo de 0,3 (Bozzoni *et al.*, 2020).

Outras métricas estatísticas foram utilizadas na avaliação da simulação das vazões mensais incluindo o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CN) (Nash e Sutcliffe, 1970), VIES e a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) (Wilks, 2006), definidos respectivamente nas Eqs. (3) a (5). Sendo (F) os valores estimados pelo modelo, (O) os valores observados a serem comparados, (\bar{O}) os valores médios observados e (n) o número da amostra.

$$CN = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O - F)^2}{\sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$VIES = \frac{1}{n} \sum (F - O) \quad (4)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (F - O)^2} \quad (5)$$

O coeficiente de Nash-Sutcliffe é frequentemente usado para avaliar o desempenho de modelos hidrológicos, podendo variar de $-\infty$ a 1. O valor de $CN = 1$ corresponde a um ajuste perfeito das vazões simuladas aos dados

foram utilizadas algumas funções objetivas no processo de treinamento/calibração e validação. Foram calculados parâmetros estatísticos para avaliação de desempenho do modelo como: Coeficiente de Correlação ou Correlação de Pearson (CC). Apresentado conforme equação abaixo (Eq. (2)):

observados. Valores de CN entre 0 e 1 geralmente são vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto valores $CN < 0$ indicam que o valor médio observado é um preditor melhor do que o valor simulado, o que indica desempenho inaceitável. Valores entre $0,50 < CN < 0,65$ indicam um modelo de qualidade satisfatório nas simulações de vazões (Moriasi *et al.*, 2007).

Espera-se que o VIES seja sempre próximo de zero nos resultados, indicando uma boa simulação dos modelos aplicados. A Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM), foi utilizado para tentar obter uma indicação quantitativa do erro do modelo em termos da quantidade dimensionada.

2.6. Processo de calibração e validação

Um passo importante realizado no trabalho, verificar se a técnica de RCP na modelagem chuva-vazão é capaz de representar de maneira precisa a vazão observada a partir das suas respectivas simulações. Para isso, o conjunto dos dados de chuva (variável preditora) e vazão (variável resposta) foram divididos em dois períodos distintos, primeiro período para treinamento/calibração do modelo chuva-vazão e o segundo período no processo de validação das simulações.

Na etapa de treinamento/calibração validações cruzadas entre as vazões mensais simuladas e observadas foram realizadas e calculado os coeficientes de correlação (CC), considerando cada mês e posto fluviométrico separadamente. Nesta etapa, as vazões médias mensais na BHX foram simuladas com a precipitação do mês atual e com a precipitação defasada de 1 a 3 meses, representadas por $t(0)$, $(t-1)$, $(t-2)$ e $(t-3)$, respectivamente. Esse procedimento foi realizado para obter entendimento intuitivo sobre o grau de relacionamento entre a precipitação e a vazão na BHX e para identificar o número apropriado de valores antecedentes de precipitação como entrada no modelo chuva-vazão para simulação da vazão mensal nas estações da bacia.

Identificado os valores apropriados antecedentes de precipitação mensal de cada estação fluviométrica na BHX, inicia-se o processo de validação das simulações,

comparando os pares de previsão-observação do período não incluído no processo de calibração. A validação é feita com a avaliação das métricas estatísticas selecionados Coeficiente de Correlação (CC), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (CN), VIES, Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM). Essa metodologia é usualmente utilizada na aplicação da modelagem chuva-vazão, visando obter o melhor arranjo empírico e desempenho do modelo (Câmara et al., 2016; Malfatti et al., 2018).

3. Resultados e Discussão

Os resultados nas análises das correlações cruzadas no período de treinamento/calibração entre 1981 a 2010, mostram que os melhores desempenhos nas simulações das vazões mensais na BHX foram obtidos com a precipitação mensal defasada no tempo $t(0)$ e $(t-1)$, os valores dos coeficientes de correlação encontrados nesta etapa são mostrados na Tabela 2. Se destacaram nas simulações das vazões mensais as estações fluviométricas de Pousada Matrinxa no tempo $t(0)$ e Altamira $(t-1)$, com os valores do coeficiente de correlação de 0,75 e 0,71 respectivamente. As simulações de vazões mensais com defasagens maiores na precipitação $(t-2)$ e $(t-3)$, apresentaram resultados menos satisfatórios em comparação as defasagens anteriores.

Conforme os resultados mostrados na Tabela 2, fica evidente que nas estações fluviométricas da BHX com grandes áreas de drenagem (Altamira, Pedra do Ó, Cajueiro, Boa Esperança e Jusante do Rio Preto) a vazão mensal em um determinado mês (t), está mais relacionada com as chuvas do mês anterior $(t-1)$ nas simulações realizadas. Estes resultados indicam que a contribuição da precipitação nestas localidades da BHX demora no máximo um mês para contribuir com a vazão mensal.

Já nas estações fluviométricas da BHX com área de drenagem menores, abaixo de 12.000 km² (Consul, Fazenda Itaguaçu e Pousada Matrinxa), a vazão mensal em um determinado mês (t) está mais relacionada com as chuvas do mesmo mês, ou seja, sem defasagem $t(0)$ nas

Tabela 2 - Coeficientes de Correlação (CC) entre as vazões simuladas e observadas no período de treinamento, nas estações fluviométricas da BHX.

Estação	Rio	Área (km ²)	$t(0)$	$(t-1)$	$(t-2)$	$(t-3)$
Altamira*	Xingu	448.000	0,59	0,71	0,57	0,55
Pedra do Ó	Iriiri	122.000	0,60	0,70	0,56	0,53
Cajueiro	Curuá	35.600	0,57	0,66	0,47	0,42
Boa Esperança	Fresco	42.400	0,62	0,66	0,50	0,52
Jusante do Rio Preto	Comandante Fontoura	12.000	0,54	0,64	0,53	0,50
Consul	Van den Steinen	8.900	0,52	0,49	0,43	0,47
Fazenda Itaguaçu	Rio Ronuro	3.840	0,61	0,54	0,44	0,43
Pousada Matrinxa	Culuene	11.600	0,75	0,50	0,49	0,42

*Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

simulações do modelo, nestes casos, os resultados demonstram que a contribuição da precipitação na vazão mensal ocorre dentro do mesmo mês. Estes resultados corroboram com metodologia similar adotada em outras bacias estudadas (Bravo et al., 2012 e Malfatti et al., 2018).

Definido acima o grau de relação entre a precipitação e a vazão mensal para cada estação fluviométrica da BHX, na Tabela 3 são mostrados os coeficientes de correlações para todos os meses separadamente no resultado do desempenho individual das estações fluviométricas na simulação das vazões mensais com a precipitação defasada no tempo $t(0)$ e $(t-1)$ no período de treinamento/calibração. De uma maneira geral, a técnica de RCP aplicada conseguiu simular bem a vazão com base na precipitação em praticamente todos os meses do ano nas estações fluviométricas analisadas, contudo, algumas estações e meses se destacaram no período de treinamento/calibração. Destaca-se positivamente os resultados encontrados nas estações fluviométricas de Altamira e Pousada Matrinxa, onde os valores do coeficiente de correlação foram superiores a 0,50 em todos os meses do ano, indi-

Tabela 3 - Coeficientes de correlação (CC) mensais entre as vazões simuladas e observadas nas estações fluviométricas na BHX, no período de treinamento/calibração.

Estação	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Altamira*	0,84	0,70	0,75	0,75	0,91	0,82	0,60	0,56	0,66	0,53	0,75	0,70
Pedra do Ó	0,89	0,71	0,74	0,67	0,83	0,81	0,66	0,48	0,81	0,36	0,75	0,73
Cajueiro	0,60	0,68	0,87	0,68	0,86	0,67	0,65	0,46	0,73	0,23	0,76	0,76
Boa Esperança	0,58	0,75	0,49	0,72	0,78	0,85	0,79	0,51	0,67	0,41	0,55	0,77
Jusante do Rio Preto	0,61	0,58	0,81	0,55	0,57	0,69	0,57	0,49	0,78	0,71	0,57	0,75
Consul	0,40	0,63	0,51	0,49	0,40	0,54	0,61	0,60	0,32	0,70	0,41	0,63
Fazenda Itaguaçu	0,68	0,57	0,78	0,60	0,73	0,41	0,57	0,59	0,49	0,77	0,64	0,49
Pousada Matrinxa	0,73	0,79	0,86	0,61	0,78	0,78	0,56	0,84	0,69	0,84	0,90	0,67

*Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

cando uma correlação de moderada a forte na simulação da vazão média mensal nestas localidades.

Destaca-se ainda na avaliação mensal mostrada na tabela acima, os resultados encontrados nos meses de fevereiro e julho, onde em todas as estações fluviométricas da BHX foram observadas correlações moderadas a fortes entre as vazões simuladas e observadas, com valores de $CC \geq 0,50$. Valores máximos no coeficiente de correlação, $CC \geq 0,90$ foram observados nas estações de Altamira e Pousada Matrinxa nos meses maio e novembro respectivamente, indicando uma correlação muito forte nestes meses entre as vazões observadas e simuladas.

Aleatoriamente, em alguns poucos meses os resultados apresentaram uma correlação fraca nas simulações das vazões na BHX, principalmente na estação de Cajueiro no mês de outubro, onde o coeficiente de correlação apresentou valor de $CC = 0,23$. Em geral, o trimestre agosto/setembro/outubro (período de estiagem), mostrou o pior desempenho nas simulações das vazões mensais durante o período de treinamento/calibração (exceto na estação fluviométrica em Pousada Matrinxa). Ainda é possível identificar que a estação fluviométrica de Consul apresentou valores no coeficiente de correlação $CC \leq 0,70$ em todos os meses do ano, indicando uma correlação moderada entre as vazões simuladas e observadas, com valores de CC abaixo 0,5 em alguns meses.

Para apoiar a análise dos resultados, informações descritivas das vazões mensais para o período de 1981 a 2010 nas estações fluviométricas da BHX são apresentadas na Tabela 4. A estação de Altamira concentra as contribuições de vazões de todas os demais rios na BHX, onde são observados os maiores volumes de vazões mensais com média anual de $8114 \text{ m}^3/\text{s}$. Nas estações Consul e Fazenda Itaguaçu são observados os menores volumes de vazões com média anual de 116 e $81 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

Tabela 4 - Informações descritivas das series de vazões mensais para o período de 1981 a 2010 nas estações fluviométricas da BHX.

Estação	Rio	Mínima (m ³ /s)	Média (m ³ /s)	Máxima (m ³ /s)
Altamira*	Xingu	770	8114	29088
Pedra do Ó	Iriri	65	2421	9883
Cajueiro	Curuá	36	805	3354
Boa Esperança	Fresco	40	895	3851
Jusante do Rio Preto	Comandante Fontoura	16	210	707
Consul	Van den Steinen	51	116	233
Fazenda Itaguaçu	Rio Ronuro	37	81	223
Pousada Matrinxa	Culuene	35	264	1514

*Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

Na Tabela 5 são apresentadas as métricas estatísticas selecionadas para avaliar o desempenho da simulação das vazões mensais no período de verificação entre 2011 e 2016 nas estações fluviométricas da BHX. O modelo conseguiu representar bem as vazões mensais observadas nas estações selecionadas neste período. O coeficiente de correlação ficou acima de 0,80 e o Coeficiente de Nash-Sutcliffe acima de 0,59 em todas as estações avaliadas, indicando uma correlação de moderada a forte entre as vazões simuladas e observadas na BHX.

Uma métrica importante avaliada o *VIÉS*, apresentou valores negativos nas simulações no período de verificação, apontando para uma subestimativa discreta do modelo, exceto na estação fluviométrica Pousada Matrinxa, onde o *VIÉS* foi positivo igual a $49 \text{ m}^3/\text{s}$, indicando superestimativa discreta na simulação das vazões mensais nesta estação (Tabela 5). A *REQM* apresentou valores baixos em relação ao volume de vazão mensal observado em cada estação da BHX. Destaca-se na Tabela 5 os menores valores da *REQM*, de 12 e $26 \text{ m}^3/\text{s}$, nas estações Fazenda Itaguaçu e Consul respectivamente.

Ainda na etapa de validação da modelagem chuva-vazão aplicada são apresentadas as vazões mensais simuladas e observadas referente ao período entre 2011 a 2014 na estação fluviométrica de Altamira no rio principal Xingu, que representa a estação de referência no exutório da BHX (montante do reservatório de Belo Monte). Assim como, o gráfico de dispersão entre as vazões mensais simuladas e observadas e os Coeficientes de Correlação (*CC*), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (*CN*), *VIÉS*, e a Raiz do Erro Quadrático Médio (*REQM*), para estação fluviométrica de Altamira na BHX.

Tabela 5 - Métricas Estatísticas entre as vazões mensais simuladas e observadas no período de validação nas estações fluviométricas da BHX.

Estação	Rio	Período	CC	CN	VIÉS	REQM
Altamira*	Xingu	2011-2014	0,95	0,90	-343	2352
Pedra do Ó	Iriri	2011-2014	0,93	0,84	-317	1001
Cajueiro	Curuá	2011-2016	0,84	0,68	-93	301
Boa Esperança	Fresco	2011-2016	0,85	0,70	-176	484
Jusante do Rio Preto	Comandante Fontoura	2011-2014	0,96	0,83	-46	76
Consul	Van den Steinen	2011-2014	0,95	0,70	-20	26
Fazenda Itaguaçu	Rio Ronuro	2011-2016	0,80	0,59	-1	12
Pousada Matrinxa	Culuene	2011-2016	0,87	0,74	49	111

*Estação de referência no exutório da BHX, utilizada na validação do modelo chuva-vazão.

Para melhor entender o comportamento entre a precipitação e a vazão mensal em Altamira foi elaborada a climatologia destas variáveis com dados observados das estações meteorológica do INMET e fluviométrica da ANA para o período de 1981 a 2010 (Fig. 2). A Fig. 2 mostra um regime de chuva bem definido em Altamira, um período menos chuvoso entre os meses de junho a novembro, onde no trimestre agosto/setembro/outubro são registrados os menores volumes de chuva com valores climatológicos mensais abaixo de 50 mm, e um período chuvoso entre os meses de dezembro a maio, onde no trimestre fevereiro, março e abril são registrados os maiores volumes de chuva, com valores climatológicos mensais acima de 300 mm.

A climatologia da vazão mensal em Altamira segue comportamento similar ao da precipitação, com um período de vazante entre os meses de julho a dezembro e um período de cheia entre os meses de janeiro a junho. Conforme demonstrado na Fig. 2, o mês de abril apresenta o volume máximo de vazão observado, aproximadamente 20000 m³/s e o mês de setembro apresenta o volume mínimo de vazão observado, aproximadamente 1200 m³/s. De acordo com a climatologia o pico de vazão observado em abril, em geral ocorre posteriormente ao mês com maior volume de chuva em março. Fica evidente em Altamira a relação e dependência da vazão do mês (*t*) com a chuva do mês anterior (*t* - 1), principalmente no período chuvoso e de transição dezembro-janeiro e maio-junho.

O grau de relação entre precipitação e vazão nos meses de pico (cheia e estiagem) na estação fluviométrica de referência em Altamira ficou demonstrado na Fig. 2. Devido ao ciclo sazonal da chuva na Amazônia os rios apresentam os seus níveis mais altos poucos meses após as chuvas mais intensas. Consequentemente, na Amazônia

períodos de seca meteorológica com poucas chuvas na estação chuvosa, são seguidos por períodos de seca hidrológica, com níveis baixos dos rios na estação de cheia (Marengo e Espinosa, 2015).

A evolução mensal da cota fluviométrica do Rio Xingu em Altamira associada aos eventos de El Niño e La Niña no período de 1979 a 2012 foi avaliada por Franco *et al.*, 2009. Para anos de atuação de El Niño, os resultados evidenciaram padrões de convecção tropical anormalmente enfraquecidos nas regiões de atuação da ZCIT e da ZCAS, resultando consequentemente na ocorrência de anomalias negativas de precipitação em grande parte da Amazônia, explicando, assim, o regime hidrológico predominantemente abaixo da média no rio Xingu em Altamira-PA. Já para anos de La Niña, essas anomalias no padrão da convecção tropical nestas regiões se inverte, e o regime hidrológico observado predomina acima da média no Rio Xingu em Altamira.

As vazões mensais simuladas e observadas na estação fluviométrica em Altamira no período de validação são mostradas na Fig. 3. De uma maneira geral, o modelo conseguiu simular muito bem as vazões médias mensais, principalmente nos meses de estiagem (junho a novembro). Nos meses de fevereiro, março e abril, onde ocorre os eventos de cheia, o modelo conseguiu capturar o mês com a vazão máxima observada em praticamente todo o período, exceto no ano de 2014. Na maioria dos meses no período de cheia, houve uma subestimativa discreta do modelo, com exceção no mês de abril de 2013, onde o modelo superestimou a vazão mensal observada em função da precipitação acumulada. Modelos hidrológicos devem ser aplicados e avaliados com cautela no período chuvoso, onde ocorrem os eventos extremos de precipitação e consequentemente vazões de pico (Lucas *et al.*, 2009).

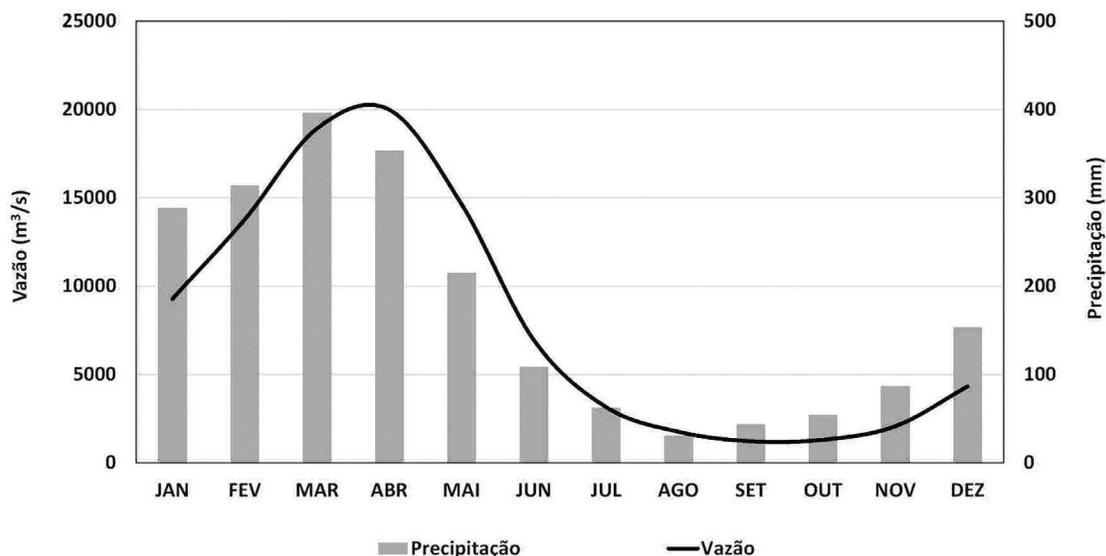


Figura 2 - Climatologia mensal da precipitação e vazão em Altamira no período de 1981 a 2010.

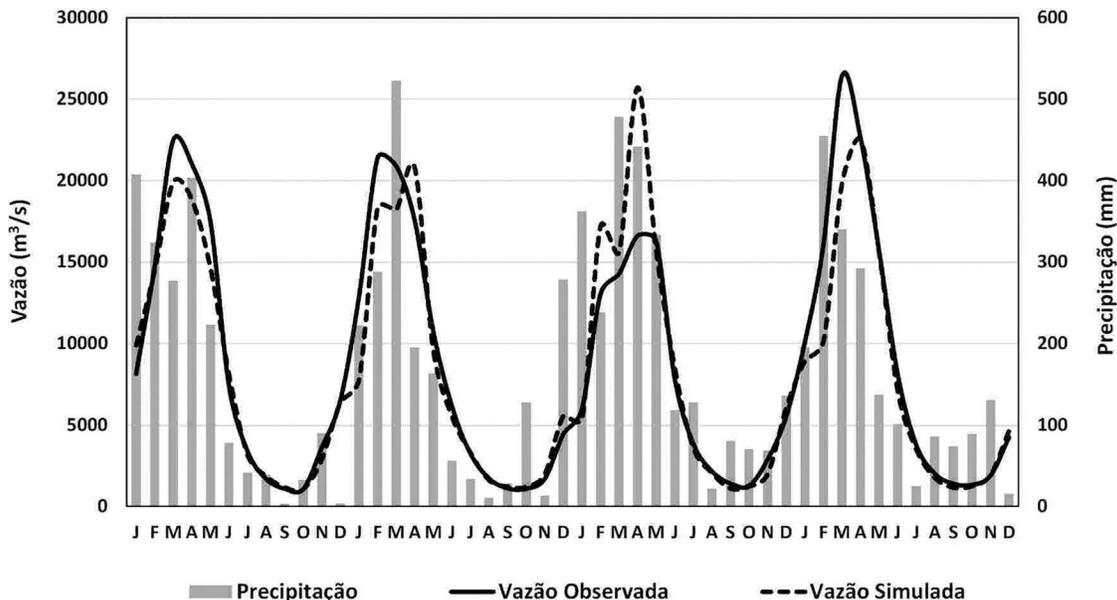


Figura 3 - Precipitação mensal observada e vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira, período de 2011 a 2014 (validação).

De acordo com o gráfico de dispersão entre as vazões médias mensais simuladas e observadas na estação fluviométrica de Altamira no período de validação (Fig. 4), os resultados foram considerados satisfatórios, com os valores dos indicadores de desempenho selecionados de coeficiente de correlação (*CC*) igual a 0,96 e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (*CN*) igual a 0,90. De acordo com a literatura, os resultados encontrados nestes indicadores apontam para uma correlação muito forte entre a vazão simulada e observada em Altamira. O erro (*VIES*) apresentou um valor negativo discreto de $-343 \text{ m}^3/\text{s}$, demonstrando subestimativa nas simulações das vazões mensais. A *REQM* apresentou o valor de $2343 \text{ m}^3/\text{s}$, considerado baixo em relação ao grande volume de vazão mensal observado na estação fluviométrica de Altamira.

Lucas *et al.* (2009), simularam a vazão mensal na região hidrográfica do Xingu no Pará, aplicando um modelo determinístico de dois parâmetros e o modelo estocástico ARIMA. O modelo determinístico com uma estrutura simples apresentou bons resultados, porém mostrou-se sensível a eventos extremos de precipitação. O modelo estocástico ARIMA, conseguiu capturar a dinâmica das séries temporais, apresentando melhores resultados na simulação comparado ao modelo determinístico, onde os coeficientes de Nash-Sutcliffe apresentaram valores de 0,73 e 0,90 respectivamente na estação de Altamira. Os resultados do modelo empírico chuva-vazão aplicado neste trabalho, corroboram com estudo de Lucas *et al.* (2009), no desempenho satisfatórios desta categoria de modelo na simulação da vazão mensal na BHX.

Malfatti *et al.* (2008); desenvolveram modelos empíricos de Regressão Linear Múltipla para previsão de vazões mensais defasadas no tempo na Usina Hidrelétrica

de Itaipu - Bacia do Rio Paraná. De um modo geral, os modelos validados indicaram melhor desempenho nas defasagens mais curtas quando considerado os preditores de vazão e precipitação. Para preditores climáticos como Índices de El Niño Oscilação Sul e anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Tropical Sul, os modelos mostraram melhores resultados nas defasagens mais longas. Para os autores, os modelos empíricos são ferramentas úteis, pois podem ser facilmente ajustados a diferentes localidades, períodos e conjunto de dados. Estes resultados reforça a aplicação satisfatória de modelos

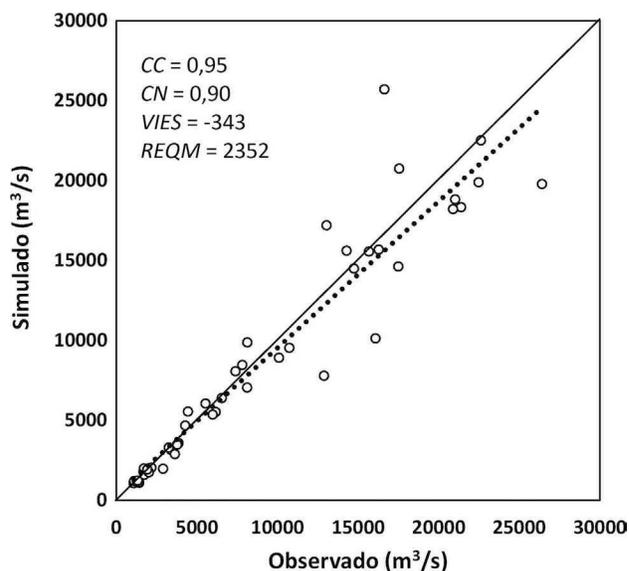


Figura 4 - Dispersão entre as vazões mensais simuladas e observadas na estação de Altamira no período de 2011 a 2014 (validação).

empíricos na simulação de vazões mensais em grandes bacias com aproveitamento energético, como demonstrado neste trabalho na BHX.

Villar *et al.* (2009), mostraram que mudanças extremas nas descargas dos rios da bacia Amazônica estão associadas com a variabilidade regional da precipitação e a circulação atmosférica, bem como, aos indicadores climáticos tropicais de grande escala. Com base nestes resultados, previsões climáticas sazonais de precipitação confiáveis que consideram as influências remotas do clima (como as previsões disponibilizadas pelos Serviços Meteorológico Nacionais e Instituto de Pesquisas), podem ajudar a melhorar os resultados das simulações das vazões mensais dos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, como neste modelo empírico aplicado neste trabalho.

4. Conclusões

Ficou demonstrado o grau de relação entre precipitação e vazão mensal nas estações fluviométricas da BHX, identificando-se o número apropriado de defasagens de precipitação como entrada no modelo chuva-vazão para cada estação. A partir das simulações realizadas, verificou-se que para estações fluviométricas localizadas em grandes áreas de drenagem a vazão mensal em um determinado mês (t), está mais relacionada com as chuvas do mês anterior ($t - 1$). Já estações fluviométricas localizadas em áreas de drenagem menores mostraram vazões mensais mais correlacionadas com as precipitações do mesmo mês $t(0)$.

A RCP aplicada à simulação das vazões mensais apresentou bons resultados em todas as estações selecionadas. Na estação fluviométrica de Altamira, referência da BHX, os resultados foram promissores e satisfatórios, com o modelo conseguindo capturar a dinâmica da série temporal e mostrando excelente desempenho nas simulações das vazões nos meses de estiagem (maio a outubro), porém, apresentou uma subestimativa discreta no período chuvoso (novembro a abril).

Com base nos resultados, a modelagem empírica chuva-vazão aplicada utilizando RCP atende uma demanda de previsões menos complexas, mais rápidas e confiáveis principalmente em grandes bacias como na Amazônia, com problemas de disponibilidade de dados de entrada dos modelos conceituais, mostrando-se uma ferramenta útil e operacional nas simulações de vazões mensais na BHX.

Previsões de vazões mensais utilizando RCP podem ser realizadas com dados de precipitação mensal disponibilizados de previsões climáticas sazonais e/ou cenários climáticos, sendo capazes de auxiliar e apoiar a tomada de decisões em setores-chave, como planejamento da geração de energia elétrica na usina hidroelétrica Belo Monte e no gerenciamento dos usos múltiplos dos recursos hídricos na BHX.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e a Agência Nacional de Águas - ANA, pelo fornecimento de dados e apoio no desenvolvimento do trabalho. Os revisores anônimos são reconhecidos por seus valiosos comentários e sugestões.

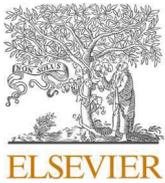
Referências

- ALEXANDRE, A.M.B. **Previsão de Vazões Mensais Para o Sistema Interligado Nacional Utilizando Informações Climáticas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- ALMEIDA, L.; SERRA, J.C.V. Hydrological models, types and applications used more. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.
- ANA - AGENCIA NACIONAL DE AGUAS. **HIDROWEB v3.1.1 - Séries Históricas de Estações**. Disponível em <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>, acesso em 5 de ago. de 2019, 2018.
- BISHOP, C.M. **Pattern Recognition and Machine Learning**. New York: Springer, 758 p., 2006.
- BOZZINI, P.L.; MELLO JUNIOR, A.V. Previsões de precipitação de modelos atmosféricos como subsídio à operação de sistemas de reservatório. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 99-109, 2020.
- BRAVO, J.M.; ALLASIA, D.; PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Coupled hydrologic-hydraulic modeling of the upper Paraguay River Basin. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2012.
- CÂMARA, R.K.C.; ROCHA, E.J.P.; PROTÁZIO, J.M.B.; QUEIROZ, J.C.; RIBEIRO, W.M.N. et al. Hydrological stochastic modeling applied to the Tocantins River to the city of Marabá (PA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2016.
- COE, M.T.; COSTA, M.H.; SOARES-FILHO, B.S. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. **Journal of Hydrology**, v. 369, n. 1-2, p. 165-174, 2009.
- CPRM. **Bacia do Xingu - Características**. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/sace/xingu_caracteristicas.php, acesso em 5 ago. 2019, 2019.
- DA SILVA, P.E.; SILVA, C.M.S.; SPYRIDES, M.H.C.; ANDRADE, L.M.B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 2, p. 1-17, 2018.
- DA SILVA, P.E.; SANTOS E SILVA, C.M.; SPYRIDES, M.H.C.; ANDRADE, L.M.B. Analysis of climate extreme indices in the Northeast Brazil and the Brazilian Amazon in the period from 1980 to 2013. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 42, n. 2, p. 137-148, 2019.
- DE MENEZES, J.B.; BANDEIRA, O.M.; LEITE, D.T. A construção do complexo hidrelétrico de Belo Monte: quarta maior do mundo em capacidade instalada. **Revista Brasileira de Engenharia de Barragens** - Edição Especial Belo Monte, v. 4, p. 5-21, 2017.

- DEVI, G.K.; GANASRI, B.P.; DWARAKISH, G.S. A Review on Hydrological Models. **Aquatic Procedia**, v. 4, n.1, p. 1001-1007, 2015.
- DIAS, V.S.; LUZ, M.P.; MEDERO, G.M.; NASCIMENTO, D.T.F. An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. **Water**, v. 10, n. 5, p. 1-18, 2018.
- DUAN, L.; LIU, T.; WANG, X.; LUO, Y.; WU, L. Development of a regional model estimating annual runoff in the Hailar river basin of China. **Journal Water Resource and Protection**, v. 2, n. 11, p. 934-943, 2010.
- ESQUIVEL, A.; LLANOS-HERRERA, L.; AGUDELO, D.; PRAGER, S.D.; KATIA FERNANDES; ROJAS, A.; VALENCIA, J.J.; RAMIREZ-VILLEGAS, J. Predictability of seasonal precipitation across major crop growing areas in Colombia. **Climate Services**, v. 12, n. 4, p. 36-47, 2018.
- FILHO, F.A.S.; LALL, U. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 2, p. 61-74, 2004.
- FRANCO, V.S.; SOUZA, E.B.; LIMA, A.M.M.; SOUZA, A.L.; PINHEIRO, A.N.; DIAS, T.S.; AZEVEDO, F.M. Climatologia e previsão hidrológica de cheia sazonal do rio Xingu, Altamira-PA. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, n. 1, p. 1-19, 2018.
- HOTELLING, H. The relations of the newer multivariate statistical methods to factor analysis. **British Journal of Mathematical Statistical Psychology**, v. 10, n. 2, p. 69-79, 1957.
- HU, T.; WU, F.; ZHANG, X. Rainfall-runoff modeling using principal component analysis and neural network. **Nordic Hydrology**, v. 38, n. 3, p. 235-248, 2007.
- IRI - INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR CLIMATE AND SOCIETY. **The Climate Predictability Tool**. Disponível em <https://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cpt/>, 2019, acesso em 5 ago. de 2019.
- IZENMAN, A.J. **Modern Multivariate Statistical Techniques**. New York: Springer, 758 p., 2008.
- JOLLIFFE, I.T. A note on the use of principal components in regression. **Applied Statistics**, v. 31, n. 3, p. 300-303, 1982.
- KENDALL, M.G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 120 p., 1975.
- KIPKOGEL, O.; MWANTHI, A.M.; MWESIGWA, J.B.; ATHERU, Z.K.K.; WANZALA, M.A.; ARTAN, G. Improved seasonal prediction of rainfall over East Africa for application in agriculture: statistical downscaling of CFSv2 and GFDL-FLOR. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 56, n. 12, p. 3229-3243, 2017.
- LANDMAN, W.A.; BARNSTON, A.G.; VOGEL, C.; SAVY, J. Use of El Niño-Southern Oscillation related seasonal precipitation predictability in developing regions for potential societal benefit. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 14, p. 5327-5337, 2019.
- LUCAS, E.W.M.; SOUSA, F.A.S.; SILVA, F.D.S.; LUCIO, P.S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à Região Hidrográfica do Xingu - Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24 n. 3, p. 308-322, 2009.
- LUCIO, P.S., *et al.* Um modelo estocástico combinado de previsão sazonal para a precipitação no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 70-87, 2010.
- MALFATTI, M.G.L.; LINGIARDI, A.M.; CARDOSO, A.O. Modelo empírico para previsão de vazão de rios - Caso Itaipu. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Recife-PE, SBMET, 2014.
- MALFATTI, M.G.L.; CARDOSO, A.O.; HAMBURGER, D.S. Modelo empírico linear para Previsão de vazão de Rios na Usina Hidrelétrica de Itaipu - Bacia do Rio Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 257-268, 2018.
- MARENGO, J.A.; ESPINOZA, J.C. Review Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2015.
- MASON, S.J., TIPPETT, M.K. **Climate Predictability Tool version 15.5.10**, 2017. <https://academiccommons.columbia.edu/doi/10.7916/D8G44WJ6>.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D.; VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n.3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFF, J. River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.
- NORTE ENERGIA. **UHE Belo Monte, A Maior Usina Hidrelétrica 100% Brasileira**. Brasília: Norte Energia. Disponível em <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/a-usina>, acesso em ago. 2019, 2018.
- OTTO, M. **Chemometrics**. Weinheim: Wiley, 328 p., 1999.
- PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H.; DOS SANTOS, C.A.C. Evaluation of the performance of SM2RAIN-derived rainfall products over Brazil. **Remote Sensing**, v. 11, n. 1113, p. 1-28, 2019.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; DA ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010.
- REMESAN, R.; SHAMIM, M.A.; HAN, D.; JIMSON, M. Run-off prediction using an integrated hybrid modelling scheme. **Journal of Hydrology**, v. 372, n. 1-4, p. 48-60, 2009.
- REMESAN, R.; BRAY, M.; J. MATHEW. J. Application of PCA and Clustering Methods in input selection of Hybrid Run-off Models. **Journal of Environmental Informatics**, v. 31, n. 2, p. 137-152, 2018.
- SANTOS, E.B.; LUCIO, P.S.; SANTOS E SILVA, C.M. Synoptic patterns of atmospheric circulation associated with intense precipitation events over the Brazilian Amazon. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 128, n. 1-2, p. 343-358, 2015.
- SANTOS, C.A.; LIMA, A.M.M.; FRANCO, V.S.; ARAÚJO, I.B.; MENEZES, J.F.G.; GOMES, N.M. O. Distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Xingu. **Nucleus**, v. 13, n. 2, p. 223-230, 2016.
- SILVA, J.P.; PEREIRA, D.I.; AGUIAR, A.M.; RODRIGUES, C. Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. **Journal of Maps**, v. 9, n. 2, p. 254-262, 2013.
- STICKLER, C.M.; COE, M.T.; COSTA, M.H.; NEPSTAD, D.C.; MCGRATH, D.G.; DIAS, L.C.P.; RODRIGUES, H.O.; SOARES-FILHO, B.S. Dependence of hydropower

- energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. **PNAS**, v. 4, n. 110, p. 9601-9609, 2013.
- TAYLOR, R. Interpretation of the correlation coefficient: A basic review. **Journal of Diagnostic Medical Sonography**, v. 6, n. 1, p. 35-39, 1990.
- TODINI, E. Hydrological catchment modelling: Past, present and future. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 1, p. 468-482, 2007.
- TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 678 p., 2005.
- VILLAR, J.C.E.; GUYOT, J.L.; RONCHAIL, J.; COCHONNEAU, G.; FILIZOLA, N.P.; FRAIZY, P.; LABAT, D.; OLIVEIRA, E.; ORDOÑEZ GÁLVEZ, J.J.; VAUCHEL, P. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin (1974-2004). **Journal of Hydrology**, v. 375, n. 3-4, p. 297-311, 2009.
- VILLAS-BÔAS, A. **De Olho na Bacia do Xingu. Série Cartô Brasil Socioambiental**. São Paulo: ISA, 63 p., 2012.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.
- WAGENER, T.; WHEATER, H.S. Parameter estimation and regionalization for continuous rainfall-runoff models including uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 320, n. 1-2, p. 132-154, 2006.
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. Philadelphia: Elsevier Academic Press Publications, 626 p., 2006.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.



Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon

Edmundo Wallace Monteiro Lucas^{a,b,*}, Francisco de Assis Salviano de Sousa^a,
Fabrício Daniel dos Santos Silva^c, Rodrigo Lins da Rocha Júnior^c,
David Duarte Cavalcante Pinto^c, Vicente de Paulo Rodrigues da Silva^a

^a Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, 58.109-970, Campina Grande, PB, Brazil

^b Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Eixo Monumental, Via S1, Sudoeste, 70680-900, Brasília, DF, Brazil

^c Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), Universidade Federal de Alagoas, Av. Lourival Melo Mota, s/n, Tabuleiro do Martins, 57072-900, Maceió, AL, Brazil

ARTICLE INFO

Keywords:

Air temperature
Rainfall
Extreme climate events
CLIMDEX
Trends
Temporal series

ABSTRACT

The Xingu River Basin (XRB), located in the Brazilian Amazon, is of great importance both in national and international contexts, especially regarding hydroelectric generation in the Belo Monte Hydroelectric Complex and forest conservation policies, given that the XRB is home to important conservation areas, such as the Xingu Indigenous Park. This paper analyzes climate extreme indices in the XRB, a region that lacks this sort of information. Trends in 22 climate extreme indices were evaluated, 11 of them for air temperature and 11 for rainfall, based on spatially gridded and high resolution daily data, for the period from 1980 to 2016. The temperature indices showed significant upward trends in daily temperatures (both maximum and minimum), an indication that, in recent decades, the days and nights have become warmer in the XRB. For rainfall, the indices indicated a downward trend in the central and southern regions of the XRB (Middle and Upper Xingu), and increasing rainfall in the northern region of the basin (Lower Xingu), however, with lower statistical significance when compared to air temperature indices. Commonly, the areas that presented statistically significant trends in the assessed climate extreme indices correspond to areas where there have been alterations in land cover due to increasing use in recent decades (areas of forest that were modified for pasture and agriculture) and in areas still preserved. This paper is an important tool to support decision making in management and strategic planning of water resources (for power generation and multiple uses) and for the elaboration of forest conservation policies (for combatting and controlling deforestation) in the XRB, in times when the region is under constant pressure from agribusiness for the expansion of agriculture and livestock.

1. Introduction

Knowledge of extreme events denoted by hydrometeorological variables in rainforest regions, such as the Amazon, is naturally valuable due to the impacts on local ecosystems and on socioeconomic activities carried out by the region's population (Santos et al., 2015a; Da Silva et al., 2018a). It is important to assess how the increasing deforestation occurring in the Amazon for the advancement of agriculture and cattle raising, mining, power generation, urban growth and other factors have been influencing those climate variables (Carvalho et al., 2001;

Laurance et al., 2001).

Haylock et al. (2006) analyzed rainfall patterns and extremes in South America between 1960 and 2000, as well as its connections with sea surface temperature. The authors showed that the climate extreme indices are a consistent method to assess outcomes of climate change and trends. Gallant et al. (2014), aiming to detect climate changes, used extreme indices for the United States, Europe and Australia in the period from 1950 to 2012. As a result, they detected consistent and statistically significant rise in the spatial prevalence of climate extremes. A variety of papers also used climate extreme indices in several parts of the world,

* Corresponding author. Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), Universidade Federal de Campina Grande, Av. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, 58.109-970, Campina Grande, PB, Brazil.

E-mail addresses: edmundowallace@gmail.com (E.W.M. Lucas), fsouza2011@gmail.com (F.A.S. Sousa), fabricio.santos@icat.ufal.br (F.D.S. Silva), rrodrigo.junior@hotmail.com (R.L. Rocha Júnior), david.duarte.br@gmail.com (D.D.C. Pinto), vicente.paulo@ufcg.edu.br (V.P.R. Silva).

<https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>

Received 2 March 2020; Received in revised form 18 January 2021; Accepted 24 January 2021

Available online 28 January 2021

2212-0947/© 2021 Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

including South America and Brazil (Satyamurty et al., 2010; IPCC, 2012; Skansi et al., 2013; Chang et al., 2014; Dos Santos and Oliveira, 2017; Salvador and Brito, 2017; Da Silva et al., 2019; Dos Reis et al., 2020).

Studies on the spatiotemporal variability of temperature and rainfall trends in the Brazilian Amazon indicate that the temperature shows a significant upward trend in nearly all the regions (Jiménez-Muñoz et al., 2016; Almeida et al., 2017; Marengo et al., 2018). As for rainfall, there is no evidence of significant trends, but there is great annual variability as well as in the spatial pattern of rainfall trends. Such behaviors in the temperature and rainfall trends in the Amazon may be associated with the effects of increase in the concentration of carbon dioxide, changes in land cover and natural climate variability (Almeida et al., 2017; Da Silva et al., 2018b; Silva Junior et al., 2018).

The Xingu River Basin (XRB) encompasses two important Brazilian biomes (the Amazon and the Brazilian Savannah, “Cerrado”). There are important environmental conservation areas in the XRB, such as the Xingu Indigenous Park, one of the largest indigenous conservation areas in Brazil, with approximately 26,000 km², home to several ethnicities of native Brazilian people, in addition to the exuberant fauna and flora. However, it has been constantly threatened by deforestation for the expansion of the agricultural frontier and cattle raising throughout the area surrounding the park (Villas-Bóas, 2012).

Understanding the behavior of extreme climate events in the XRB is, therefore, important to assist and substantiate decision making in key-sectors, such as management of water resources (especially hydropower energy generation) and forest conservation policies (environmental conservation areas), in addition to local demands, such as civil defense, agriculture, health, and possibly others. In this regard, this paper intends to analyze the climate extreme indices of air temperature and rainfall in the basin. The indices were obtained from gridded data with high spatial resolution.

2. Data and methods

2.1. Area of study

The Xingu River Basin (Fig. 1), an important sub-basin of the great Amazon Basin, spreading over the States of Pará (PA) and Mato Grosso (MT), has a drainage area of approximately 510,000 km² (Silva et al.,

2013). The main river, Xingu, begins in MT at the encounter of the Formosa and Roncador Mountain Ranges, in the Brazilian Savannah, and enters the Amazon biome traveling approximately 2 000 km (Dias et al., 2015). The XRB is basically divided into three regions: Upper, Middle and Lower Xingu. The main tributaries of the Xingu River are the Culene, Iri, Fresco and Bacajá rivers (Lucas et al., 2009). The XRB was explored in studies involving climate change indices, albeit in a fragmented way.

The XRB is located in the Brazilian Amazon Basin, and is home to one of the Brazilian government’s largest projects in regards to power generation, the Belo Monte Hydroelectric Complex, the world’s fourth largest hydroelectric plant in terms of installed generating capacity, and the largest energy enterprise that is 100% Brazilian. The Belo Monte reservoir has 478 km², with the potential to generate 11,000 MW, which represents almost 10% of Brazil’s demand for electricity (Stickler et al., 2013; De Menezes et al., 2017; Norte Energia, 2018).

According to the temporal variability of rainfall in the XRB, the highest amounts are observed during the austral summer, from December to March. Spatially, in the northern part of the basin (Lower Xingu), the annual average volumes are relatively higher when compared to the ones of the central and southern parts of the basin (Middle and Upper Xingu), which contribute to the water supply in the Lower Xingu. To the north of the basin, the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) acts as the main weather system responsible for rainfall modulation, whereas in the central and southern regions of the basin, rainfall comes predominantly from the South Atlantic Convergence Zone (SACZ) (Santos et al., 2015b; Dos Santos et al., 2016).

2.2. Land use and cover in the Xingu River Basin

To support the results of the analysis of trends in climate extremes indices, we sought to visually exhibit the evolution of land use and cover in the XRB region over recent decades. Thematic maps showcasing the composition of forest, savannah, pasture, agriculture, bodies of water and other surface features, such as non-vegetated areas were presented. The maps were generated using the MapBiomias tool (version 4.0), which operates from a Google Earth Engine platform and is available online, for free, at: <http://mapbiomas.org> (MAPBIOMAS, 2019a).

The Brazilian Annual Land Use and Land Cover Mapping Project (MapBiomias) is a multi-institutional initiative. It comprises non-

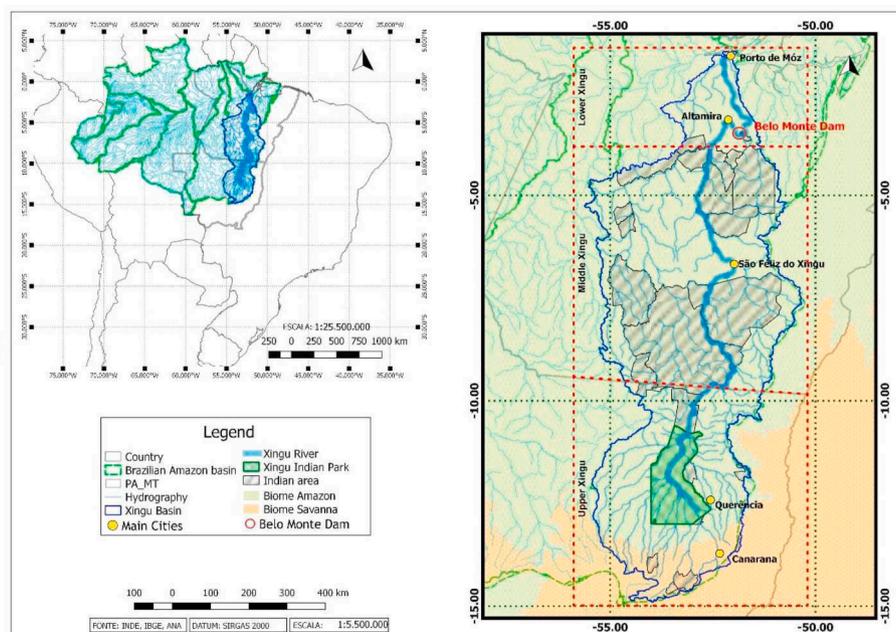


Fig. 1. Geographical location of the XRB.

governmental organizations, universities and technology companies, organized by biomes and cross-cutting themes, with the purpose of generating annual maps of land use and cover in Brazil using satellite images from LandSat series 5, 7 and 8, with spatial resolution of 30 m for the Climate Observatory's Greenhouse Gas Emissions Estimation System. The detailed description of the methodology (remote sensing and geoprocessing) of the land use and cover classification used in the project is available at [MAPBIOMAS \(2019b\)](#).

2.3. Data and climate extreme indices

In this paper, daily data of rainfall and maximum and minimum air temperatures from gridded analysis provided by [Xavier et al. \(2016\)](#) for the period ranging from 1980 to 2016 were used. Such data are part of a joint project between the University of Texas (USA) and the Federal University of Espírito Santo (Brazil), and are available in grid form with a spatial resolution of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ for the entire Brazilian territory. For the XRB, a time series of 702 grid points was used ([Fig. 4L and 5L](#)). The extreme indices were calculated considering each grid point in that database for the XRB.

In the study that provided the data, [Xavier et al. \(2016\)](#) developed a high-resolution grid with daily rainfall and temperature data, as well as five other climate variables, in order to estimate evapotranspiration in Brazil. Daily rainfall data from weather stations for the period between 1980 and 2016 were used in that study. The precision of the interpolation method is properly presented by the authors, who also claim that those gridded data sets are open and represent a significant improvement in the availability of climate data in Brazil.

For the purpose of clarifying the reason why we chose the database found in [Xavier et al. \(2016\)](#), it is worth mentioning that, in a previous work concerning the XRB, [Lucas et al. \(2019\)](#) compared daily rainfall data from two weather stations managed by the National Institute of Meteorology (INMET) from 1981 to 2010 (Altamira and São Felix do Xingu municipalities) with gridded data provided by [Xavier et al. \(2016\)](#) and the CHIRPS project: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations ([Funk et al., 2015; Liu et al., 2019](#)). The extraction of the time series from the two gridded analysis for the geographical coordinates of the stations followed the same methodology used in [Da Rocha Junior et al. \(2019\)](#). The results showed that the data set of [Xavier et al. \(2016\)](#) provided a better representation of the daily and monthly rainfall totals when compared to CHIRPS, with the first presenting a correlation coefficient value of 0.92, higher than the 0.84 value obtained through the latter, for the Altamira station. For the São Felix do Xingu station, the correlation coefficients were 0.82 and 0.72, respectively to [Xavier et al. \(2016\)](#) and CHIRPS.

The climate extreme indices that substantiate this paper are among those recommended by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) of the World Meteorological Organization (WMO). Those indices were developed by [Zhang and Yang \(2004\)](#), at the Climate Research Branch of the Meteorological Service of Canada, and are available in the RCLimDex (1.0) application, an open and accessible computing platform developed in R language ([Zhang et al., 2005](#)).

[Table 1](#) presents the description of the climate indices. A total of 22 climate extreme indices were analyzed for the XRB, 11 of them regarding air temperature data (TXx, TNx, TXn, TNn, TX10p, TN10p, TX90p, TN90p, WSDI, CSDI, DTR) and other 11 pertaining to rainfall data (RX1day, RX5day, R1mm, R10mm, R20mm, SDII, CDD, CWD, R95p, R99p, PRECTOT). The extreme indices were calculated from daily temperature and rainfall data by using the RCLimDex Software. For the analyzed indices, statistical parameters such as linear trend calculated by the method of least squares and the level of statistical significance of trends, estimated by Fisher's exact test (p-value) were observed. The results were discussed considering the spatial distribution of the 702 grid points used in the XRB, concerning the trends obtained for the 37-year data period. The data spatialization process was performed using two Barnes scheme interactions ([Barnes, 1973; Koch et al., 1983](#)). This

Table 1

List of climate air temperature and rainfall indices used in this study.

Indices	Definitions	Units
TXx	Monthly maximum value of daily maximum temperature	°C
TNx	Monthly maximum value of daily minimum temperature	°C
TXn	Monthly minimum value of daily maximum temperature	°C
TNn	Monthly minimum value of daily minimum temperature	°C
TN10p	Percentage of days when TN < 10th percentile (cold nights)	% days
TX10p	Percentage of days when TX < 10th percentile (cold days)	% days
TN90p	Percentage of days when TN > 90th percentile (warm nights)	% days
TX90p	Percentage of days when TX > 90th percentile (warm days)	% days
WSDI	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TX > 90th percentile	days
CSDI	Annual count of days with at least 6 consecutive days when TN < 10th percentile	days
DTR	Daily temperature range: monthly mean difference between TX and TN	°C
RX1day	Monthly maximum 1-day precipitation	mm
Rx5day	Monthly maximum consecutive 5-day precipitation	mm
R1	Annual count of days with rainfall ≥ 1 mm	days
R10	Annual count of days with rainfall ≥ 10 mm	days
R20	Annual count of days with rainfall ≥ 20 mm	days
SDII	Mean precipitation on wet days, with rainfall ≥ 1 mm	mm/day
CDD	Maximum number of consecutive days with rainfall < 1 mm (dry spell)	days
CWD	Maximum number of consecutive days with rainfall > 1 mm (wet spell)	days
R95p	Annual rainfall that exceeded the 95th percentile in the period from 1980 to 2016 (percentile: wet days)	mm
R99p	Annual rainfall that exceeded the 99th percentile in the period from 1980 to 2016 (percentile: wet days)	mm
PRCPTOT	Annual total precipitation on wet days (rainfall ≥ 1 mm)	mm

technique consists in assigning a weight to the observation as a function of the distance between the observation and the center of the grid point. The first interaction is performed to produce an initial rainfall field, and then the second interaction increases the amount of detail from the previous interaction. More information can be found in [Daley \(1993\)](#).

3. Results and discussion

3.1. Spatiotemporal variability of land use and cover in the XRB

[Fig. 2](#) shows thematic maps elaborated in MapBiomas exhibiting the evolution of the main land use and cover in the XRB over the past few decades, with the years of 1985, 1995, 2005 and 2015 being representatives of each decade. It is possible to observe the expansion of pasture and agricultural areas in the XRB, especially in the past two decades. According to MapBiomas statistical data, from 1985 to 2015, there was a reduction of 16.4% in forest areas and an increase in agricultural areas (sum of the area of use and cover for pasture and agriculture) of nearly 6 times. The evolution of the increase in agricultural and cattle raising areas, and the reduction of forest cover in the past four decades, can be seen in [Fig. 3](#).

According to the generated thematic maps, in the southern part of the XRB, agriculture is the main economic activity and has exhibited a considerable expansion in the neighboring area of the Xingu Indigenous Park. The substitution of the Amazon rainforest for pasture is evident in several areas of the XRB, especially in the eastern and central regions of the basin; in those areas, cattle raising activity has grown significantly in recent decades ([De Souza-Júnior and Siqueira, 2013; Panday et al., 2015](#)). In general, [Fig. 2](#) shows that the most significant land use and land cover changes are observed in the eastern and southern areas of the basin (Middle and Upper Xingu, respectively).

3.2. Air temperature

In [Fig. 4](#), the trend coefficients of the climate extreme indices

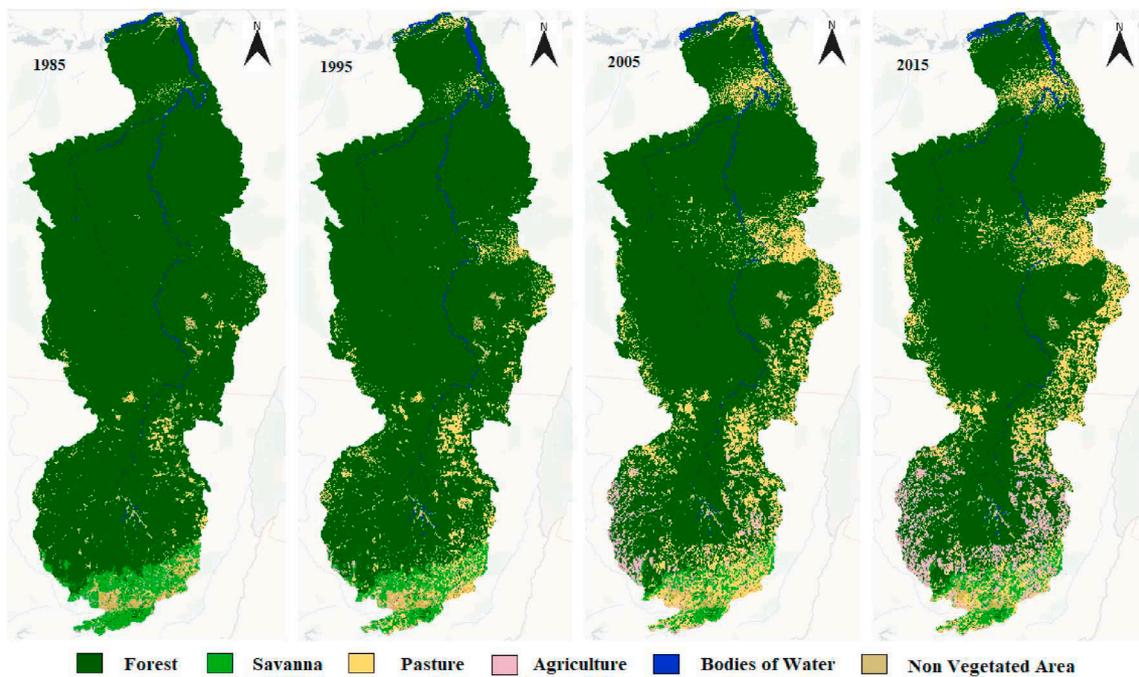


Fig. 2. Spatial composition of images of land use and cover in the XRB from 1985 to 2015. Adapted from MAPBIOMAS (2019a).

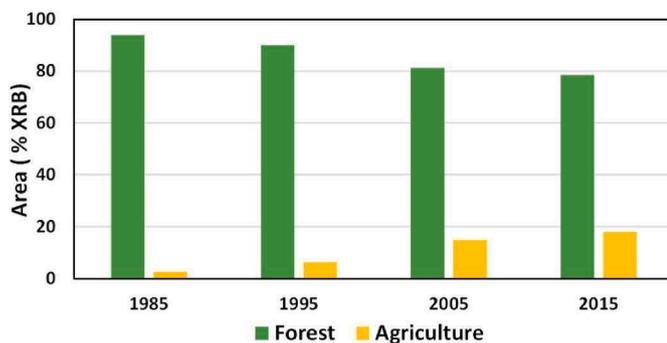


Fig. 3. Percentage area of land use and cover with forest and agriculture (pasture and agriculture) in recent decades in the XRB. Generated with data from MAPBIOMAS (2019a).

concerning air temperature in the XRB for the period from 1980 to 2016, are plotted. The black dots highlight the time series whose indices were statistically significant at a 95% confidence level, with p value < 0.05 . Table 2 shows a summary of the grid points with significant and non-significant trends at the 5% level for each analyzed air temperature extreme indices. The TXx, TNx and TN90p indices show significant trends at all grid points in the XRB. A similar methodology to the one used in this paper was applied by Wang et al. (2016) and Baez-Gonzalez et al. (2018) in the assessment of climate extremes of air temperature and rainfall in Mongolia and Mexico, respectively.

The TXx and TNx indices (Fig. 4a and b) indicate a significant upward trend throughout the XRB, reaching about 3°C in certain areas for the analyzed period (1980–2016). For the TXn and TNn indices (Fig. 4c and d), the central region of the XRB (Middle Xingu), does not show significant trends. The highest TXn and TNn values, exhibiting an overall significant increase, are observed in the southern region of the XRB (Upper Xingu).

The TX10p and TN10p indices (Fig. 4e and f) present negative trends in all the regions of the XRB, which represents a considerable reduction in cold days and nights (the ones with air temperatures below the 10% percentile). Conversely, warm days and nights present positive trends,

as the TX90p and TN90p indices (Fig. 4g and h), relative to diurnal and nocturnal temperatures that exceed the 90% percentile, are notably positive across the region. These indices are the ones that show the most pronounced positive values, especially the TN90p index, with a trend greater than 30% in several areas of the XRB (mainly in the middle and lower Xingu) and statistical significance in all the 702 grid points (Fig. 4i).

An area in the central-eastern part, at 6°S , shows an opposite behavior to that described in the previous paragraph, with positive trends observed for the TX10p index and negative for the TX90p index (Fig. 4e and g respectively). In those areas, the trends are not statistically significant and the results may also be related to the data interpolation method.

Similar to the behavior described above, the WSDI and CSDI indices (Fig. 4i and j) show upward trends in consecutive warmer days and downward trends in consecutive colder days, respectively (up to 20 days in certain areas). These indices suggest that both days and nights, in general, have become warmer in the analyzed period in virtually all the basin, indicating a greater proneness to more intense heat waves in the XRB. Similar results and conclusions can be found in Costa et al. (2020) for the Northeast region of Brazil, where, on average, a negative trend of 4.5 days/decade for CSDI was observed, whereas a positive trend of 8.7 days/decade was noted for WSDI. Such results should be regarded as particularly relevant, as they are probably associated with trends observed in other indices, such as the Consecutive Dry Days (CDD), with the CSDI possibly acting as a trigger for the CDD, or rather being a consequence of it.

The daily thermal range in the XRB presents a negative trend in the north and a positive trend in the southern part of the XRB, as shown in Fig. 4k (DTR index), but with statistical significance found only in the northern and extreme southern regions of the XRB. The downward trend in DTR may be associated to the more pronounced increase in minimum air temperature observed in the period studied when compared to maximum air temperatures. The areas where negative trends in DTR were observed are the same ones where TX10p and TX90p do not present significant trends. This result is consistent with the negative trends in TN10p and positive trends in TN90p, related to the decrease in the percentage of cold nights and the increase in the percentage of warm nights, which in turn result in a decrease in DTR.

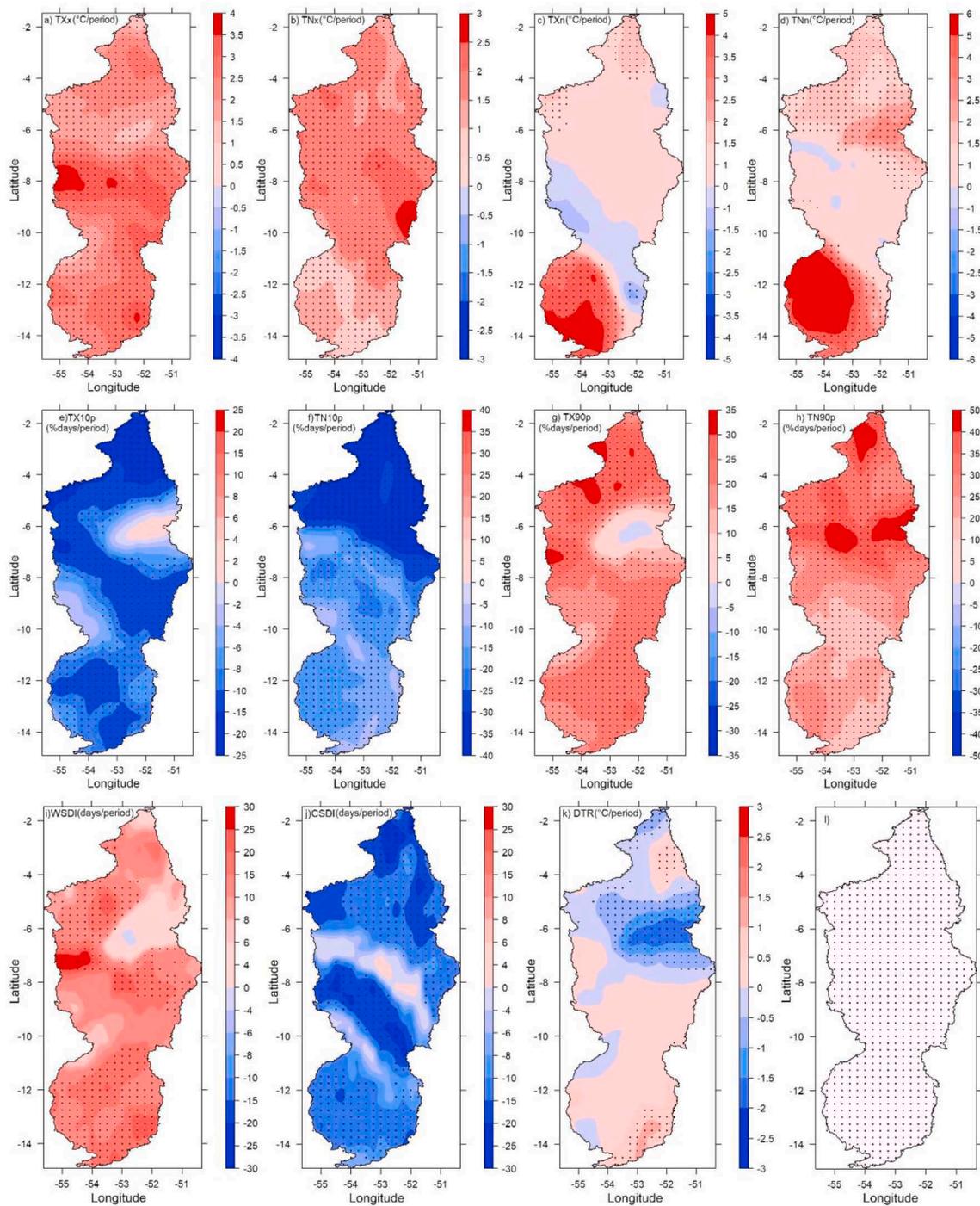


Fig. 4. Spatial distribution of trends in climate extreme indices of daily temperature in the XRB for the period from 1980 to 2016: TXx (a), TNx (b), TXn (c), TNn (d), TX10p (e), TN10p (f), TX90p (g), TN90p (h), WSDI (i), CSDI (j), DTR (k). The grid points used in the XRB for the elaboration of the air temperature indices are shown in the last map (l). Dots indicate areas where the trend is statistically significant at a 95% confidence level.

Overall, the results indicate significant upward trends in daily extreme air temperatures in the XRB. The indices show significant results mainly in the southern and northern parts of the Basin (Upper and Lower Xingu respectively), both in areas of the basin where the forest has been anthropogenically replaced and in areas still preserved. The hypothesis that such trends could be directly associated with the increasing deforestation that the region has been experiencing from the expansion of areas with land use and cover changes cannot be fully supported by these results, given that the trends are not evident exclusively in areas where the forest has been replaced by pasture and agriculture (Fig. 2). The present results are similar to previous studies on air

temperature trends in the Amazon Basin in recent decades (Marengo et al., 2018; Da Silva et al., 2019; Espinoza et al., 2019).

3.3. Rainfall

In Fig. 5, the trend coefficients of the climate extreme indices concerning rainfall in the XRB for the period from 1980 to 2016, are exhibited. The black dots highlight the time series whose indices were statistically significant at a 95% confidence level, with p value < 0.05 . Table 3 shows a summary of the grid points with significant and non-significant trend at the 5% level for each analyzed rainfall extreme

Table 2

Climate indices of air temperature and the number of grid points with non-significant (NS) and significant (S) trends and at the 5% level in the XRB, as well as the percentage of the significant (S) values.

Index	Non Significant-NS	Significant-S	(%) Significant-S
TXx	–	702	100
TNx	–	702	100
TXn	478	224	31,9
TNn	246	456	65,0
TN10p	51	651	92,7
TX10p	125	577	82,2
TN90p	–	702	100
TX90p	61	641	91,3
WSDI	336	366	52,1
CSDI	228	474	67,5
DTR	488	214	30,5

indices.

The sign of the trends in the rainfall extreme indices are not homogeneous throughout the entire XRB. Most of the trends observed in the analysis are not statistically significant (Table 3). That is especially valid for RX1day and CWD indices, which presented significance for only 9.7% and 10.4%, respectively. Previous works (Carvalho et al., 2004; De Souza et al., 2005; Grimm, 2001; De Quadro et al., 2012; Vieira et al., 2013; Santos et al., 2017) have shown a trend of shortening/displacement/decreasing in intensity during the period of strongest activity of the SACZ, the main atmospheric phenomenon that causes rainfall in the central and southern portions of the XRB.

The trends in Rx1day and Rx5day climate indices (Fig. 5a and b) show the same behaviors, but with different intensities. There are positive trends from latitude 5°S towards the north and in the central and southwest areas of the XRB; and negative trends between 5°S and 8°S, as well as in a NW-SE direction between the latitudes of 10°S and 13°S. The areas with positive trends in the Rx1day index are not statistically significant, whilst, for the Rx5day index, in the same areas, the trends are stronger and with a higher number of significant points.

The number of days in the year with rainfall above 1.0 mm and 10 mm (Fig. 5c and d, respectively) has been decreasing considerably in the central and southern parts of the XRB (Middle and Upper Xingu), where those indices present a negative trend of up to 10 days/period. An inverse behavior was observed in the northern part of the basin (Lower Xingu), for which the indices present positive trends equal to or greater than 10 days/period.

The R20mm climate index (Fig. 5e) shows a similar behavior to the Rx1day and Rx5day indices addressed above, indicating positive and negative trends that can be greater than 6 days/period of rainfall above 20 mm. The same spatial pattern of positive and negative trends observed for those three indices is also noticed for the SDII index (Fig. 5f).

The spatial pattern of the CDD index (Fig. 5g) denotes an overall positive trend in the number of consecutive dry days, most noticeably in the central and southern parts of the XRB (Middle and Upper Xingu). For the CWD climate index (Fig. 5h), significant positive trends are observed especially in the northernmost part of the basin (Lower Xingu), indicating an increase in the sequence of consecutive days with rainfall above 1.0 mm for that specific region.

Normally, opposite trends are expected for CDD and CWD, and that is observed more conspicuously in a region comprising the center-east portion of the Middle Xingu (between the latitudes 6° S and 10° S and longitudes 53° W and 51° W), where the trends are positive for CDD and negatives for CWD. Such typical behavior also happens for the Lower Xingu, with slightly negative trends for CDD and significant positive trends for CWD. However, trends of the same sign for both indices are found for specific points in Upper and Middle Xingu, where CDD and CWD trends are positive. Similar findings are reported by Oliveira et al. (2016) and Costa et al. (2020) when studying the Northeast of Brazil. These authors ponder that such results suggest an intensification of the

seasonality in those specific areas, with the dry seasons becoming drier, and the rainy seasons, wetter.

The behavior of very wet and extremely wet days, assessed by the R95p and R99p indices (Fig. 5i and j) present the same spatial pattern of the other rainfall indices trends in the XRB. Particularly very similar to the Rx1day and Rx5day indices, with a great spatial variation across the basin, alternating areas of positive trends in the northern, southern and the eastern regions, with an opposite situation being observed in the central and western areas of the XRB. Another example of similarity with those indices is the one concerning days of the year with rainfall above 20 mm (Fig. 5e), especially in the northern region of the XRB (Lower Xingu).

An additional important index to be analyzed is the one that shows the trend of annual total rainfall on wet days and compiles, to some extent, several characteristics of the previously analyzed rainfall indices, the PRCPTOT (Fig. 5k). Its spatial pattern points to significant positive trends in the northern region of the XRB (Lower Xingu) and negative trends in the central and southern regions (Middle and Upper Xingu). The rainfall trends found in PRCPTOT Index for the XRB also concur with other indices (such as Rx5day, R1mm, R10mm, R20mm, SDII, R95p and R99p).

3.4. Discussion

The results obtained for extreme temperature trends are consistent with other findings concerning temperature increase in the region. Da Silva et al. (2018b) used the same data source with a shorter time span, from 1980 to 2013, to assess trends in temperature and precipitation extreme indices at specific points in the Amazon and in the Northeast of Brazil. Regarding one of their studied locations, with geographic coordinates of 5°S and 53°W, corresponding to a point in the north of the XRB, they found significant positive trends for the TXx, TNx, TNn, TX90p and TN90p indices, and significant negative trends for the TXn, TX10p and TN10p indices. Our results agree with those obtained by Da Silva et al. (2018b), except for the TXn index, for which positive trends prevailed in the present research. In Da Silva et al. (2018b), the non-significant positive trend found for the DTR index does not reflect the reality of the whole basin, but only the point evaluated. Our results show a dipole between the center-north and center-south portions of the XRB in the DTR field, with a predominance of statistically significant negative trends in the center-north and positive trends in the center-south.

In the study by Dos Santos and Oliveira (2017), on trend analysis of climate extreme indices for 13 locations in the state of Pará, where part of the XRB is located (with the exception of the southern portion – Upper Xingu), positive trends for the TXx, TXn, TNn and DTR indices and negative trend for the TNx index were found in the São Félix do Xingu station, located in the central part of XRB (Middle Xingu). For Altamira and Porto de Moz, stations located in the north of the XRB (Lower Xingu), most indices showed statistically significant positive trends, except for TNn in Altamira and TXx in Porto de Moz. The differences to the results obtained in this research and in the study by Da Silva et al. (2018b) may be attributed to the different analysis period, which, in their case, was from 1970 to 2006, but there is consistency in regards to the fact that the temperature indices have shown mostly positive trends. And such an overall positive trend in daily air temperature indices raises serious concerns, as changes in air temperature patterns directly affect evapotranspiration in river basins, as well as evaporation in the its reservoirs. Moreover, it considerably increases the demand for water, especially for agricultural activities (Setegn et al., 2011; Dias et al., 2018).

In regards to rainfall, it is the meteorological variable that most influences flow rate, therefore, changes in rainfall patterns may affect socioeconomic activities in the region, such as agriculture and power generation. However, those impacts also vary according to other basin characteristics, such as vegetation type, land use and cover (Coe et al.,

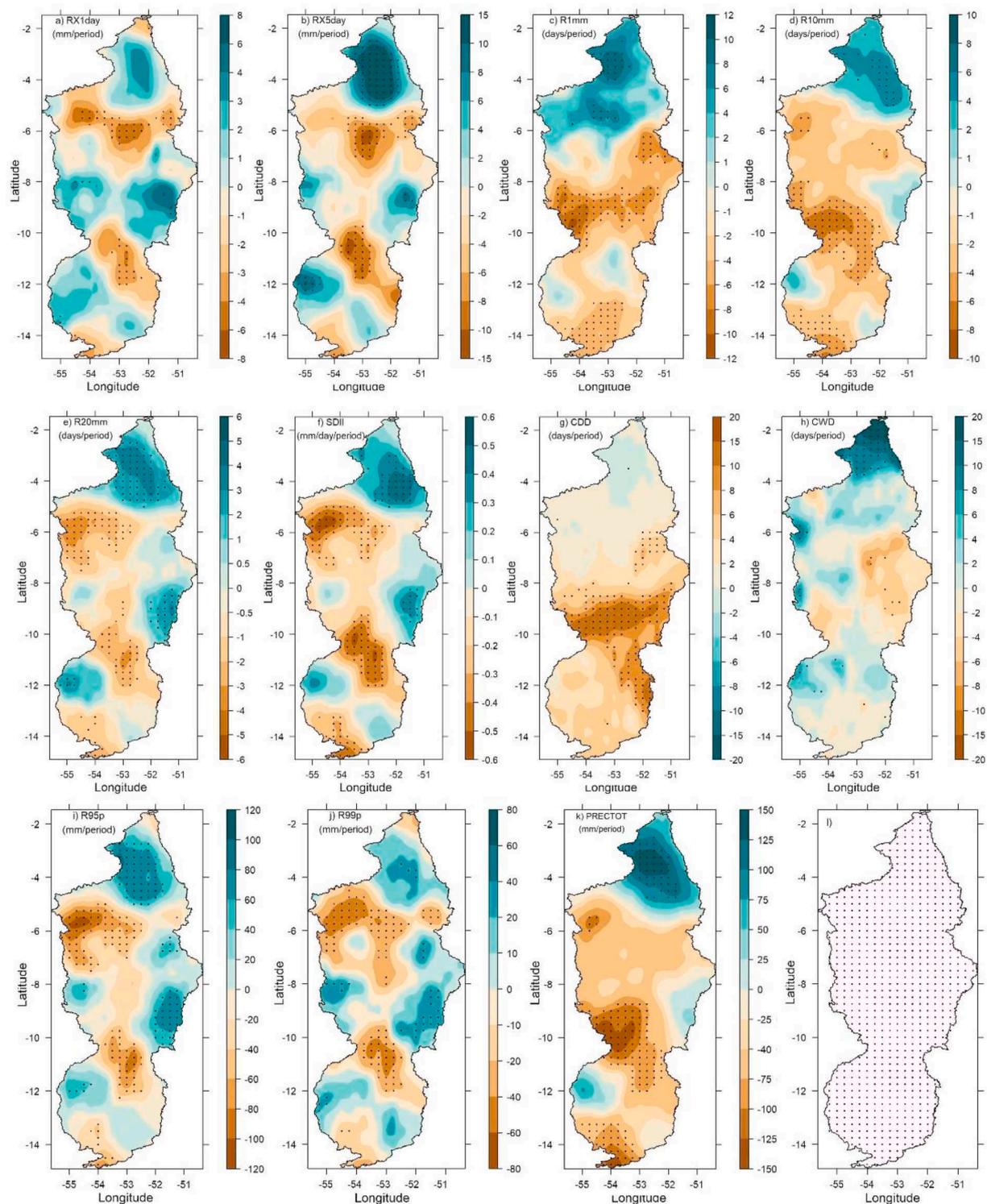


Fig. 5. Spatial distribution of trends in climate extreme indices of daily rainfall in the XRB from 1980 to 2016: RX1day (a), RX5day (b), R1mm (c), R10mm (d), R20mm (e), SDII (f), CDD (g), CWD (h), R95p (i), R99p (j), PRECTOT (k). The grid points used in the XRB for the elaboration of rainfall indices are shown in the last map (l). Dots indicate areas where the trend is statistically significant at a 95% confidence level.

2009; Dias et al., 2018). Villar et al. (2009) showed that extreme changes in river discharges in the Amazon basin are associated with the regional variability of rainfall and atmospheric circulation, as well as large-scale tropical climate indicators.

Previous works on rainfall trends show different results, but all of them agree on that the rainfall indices usually do not show statistically significant trends (Dos Santos and Oliveira, 2017; Da Silva et al., 2018b,

2019). Da Silva et al. (2018b) found statistically significant trends at the level of 5% only for the SDII, R10mm and CWD indices and for a single point located in the XRB. For the R10mm, R20mm, RX1Day, RX5Day, CDD, R95p, R99p and PRCTOT indices, the found trends were not statistically significant. According to our results, the point analyzed by Da Silva et al. (2018b) is located in a transition area between the northern portion of the basin, with a wet trend indicated by most

Table 3

Climate indices of rainfall and the number of grid points with non-significant (NS) and significant trends (S) at the 5% level in the XRB, as well as the percentage of the significant (S) values.

Index	Non Significant-NS	Significant-S	(%) Significant-S
RX1day	634	68	9,7
RX5day	555	147	20,9
R1	571	185	26,3
R10	526	176	25,1
R20	506	196	27,9
SDII	508	194	27,6
CDD	545	157	22,5
CWD	629	73	10,4
R95p	482	220	31,3
R99p	557	145	20,6
PRCPTOT	510	192	27,3

indices, and the central portion of the basin, where the prevalence of a dry trend is pointed by the indices. The results obtained in this research showcase the variability of indices for the whole area of XRB.

In the study by [Dos Santos and Oliveira \(2017\)](#), Altamira and Porto de Moz, both located in the northern part of XRB, exhibited mostly negative trends without statistical significance, except for SDII, R95p and R99p indices in Porto de Moz. For São Félix do Xingu, in the central part of the XRB, most of the trends were positive without statistical significance, except for the significant negative CWD index in the period of 1970–2006. Despite the difference regarding the analyzed periods, the statistically significant trends (SDII, CWD, P95p and P99p) found in [Dos Santos and Oliveira \(2017\)](#) survey were consistent with those found in the present research.

Particularly regarding rainfall, the spatiotemporal variation of extremes is related to the large-scale and synoptic-scale convection systems, such as: the ITCZ, which is responsible for the maximum precipitation during the austral autumn ([De Souza and Rocha, 2006](#)); the SACZ, which mainly affects southern and southwestern Amazon, being responsible for most of the rainfall from late spring to late summer ([Carvalho et al., 2004](#); [Grimm, 2011](#)); and the Bolivian High, which favours the northeast trough ([Rolim et al., 2006](#)) that is associated with summer rainfall events ([Lenters and Cook, 1997](#)).

The combination of large-scale physical and dynamic processes, as well as local systems such as the squall lines that advance from the coast to the interior of the Amazon ([Cohen et al., 1995](#); [Alcantara et al., 2011](#)), contribute to the spatiotemporal heterogeneity of extreme precipitation events and of the total annual precipitation, characterized by the PRCPTOT index ([Santos et al., 2015c](#)). Mechanisms of ocean-atmosphere interaction, such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Meridional Interhemispheric Sea Surface Temperature Gradient, also known as the Atlantic Dipole, cause recurrent impacts on the Amazon, such as droughts and floods, influencing precipitation extremes ([Liebmann and Marengo, 2001](#); [Marengo, 2008](#); [Sathler et al., 2010](#); [Xu et al., 2011](#); [Tomasella et al., 2011](#); [Marengo et al., 2013, 2018](#); [Llopert et al., 2014](#); [Marengo and Espinoza, 2016](#)).

It is difficult to establish a relationship between the patterns and trends that were found in the analyzed climate extreme indices and the observed deforestation occurred in the XRB during the past few decades. As stated by [Panday et al. \(2014\)](#), the regional water balance can be substantially altered by large-scale land cover changes, but it may be difficult to isolate their direct influence from natural climate variability. These authors estimated changes to the XRB water balance from the 1970s to 2000 due to deforestation and climatic variations. In that period, the forest was reduced from 90% to 75% across the XRB area. Climate variability and land cover change, therefore, had opposite effects on the XRB water balance, with climate effects masking deforestation-induced changes to the water budget. The results suggest that continuous deforestation in the XRB may exacerbate effects of climate extremes inherent to natural climate variability, such as droughts or atypically longer and more abundant wet periods.

4. Conclusions

Considering the importance of the Xingu River Basin in national and international regards, especially in terms of power generation (it hosts the Belo Monte Hydroelectric Complex) and forest conservation policies (it is home to important protected areas, such as the Xingu Indigenous Park), this paper represents a significant advance with respect to the knowledge on climate extremes related to air temperature and rainfall in the region (patterns and trends), given that such sort of climate information is so far, very scarce.

In view of the low density of weather stations in some regions of the world, such as in the Brazilian Amazon, the availability of high-resolution gridded data, as those used in this work, is a reliable alternative. It allowed us to identify, in the XRB, patterns and statistically significant climate trends in the air temperature and rainfall in recent decades.

The climate extreme indices assessed for the XRB show evident upward trends in air temperature throughout the basin, indicating that, in recent decades, the days and nights have become warmer. Although many grid points did not present significant trends in the climate extreme indices of rainfall, to the 5% level, assessed in the XRB, the overall results indicate positive trends with increasing daily rainfall in the northern part of the basin (Lower Xingu). Furthermore, they indicate a negative trend, with decreasing rainfall in the central and southern regions (Middle and Upper Xingu). The southern and eastern areas that present these negative trends in the XRB coincide, mostly, with areas where there have been alterations in land cover of previous forestland for pasture and agriculture in the past decades.

However, the results achieved by this research regarding extreme temperature and rainfall indices in the XRB indicate that the hypothesis of verifying a direct relationship between areas that suffered anthropic action and effects on the indices cannot be conclusive based on the data and methodology used, as the results exhibit a large variation in the spatial pattern of the trends and, for many areas, the rainfall indices are not statistically significant.

The kind of results presented in this paper, i.e., assessment of climate extremes in a region such as the XRB, represent an important support tool for decision making in water resources management and planning (multiple uses demands and needs) and for the elaboration of forest conservation policies (combating and controlling deforestation), especially in light of the constant pressure from agribusiness for the extension of lands used for agriculture and livestock. Also, the region needs mitigation and adaptation policies that specifically address the alterations in patterns of the meteorological variables studied herein. Furthermore, the results may assist in the elaboration of actions aiming for a better usage of water resources for power generation in the XRB.

Author statement

CRedit authorship contribution statement **Edmundo Wallace Monteiro Lucas**: Conceptualization; Formal analysis; Investigation; Methodology; Software; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing. **Francisco de Assis Salviano de Sousa**: Conceptualization; Formal analysis; Funding acquisition; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing. **Fabricio Daniel dos Santos Silva**: Conceptualization; Data curation; Formal analysis; Methodology; Software; Supervision; Validation; Visualization; Roles/Writing – original draft; Writing – review & editing. **Rodrigo Lins da Rocha Júnior**: Data curation; Methodology; Software; Visualization. **David Duarte Cavalcante Pinto**: Formal analysis; Visualization; Writing – review & editing. **Vicente de Paulo Rodrigues da Silva**: Formal analysis; Visualization; Funding acquisition; Writing – review & editing.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to thank National Council for Scientific and Technological Development (CNPq acronym in Portuguese) for partially funding this work through the process CNPq 401524/2016-7. The principal author also thanks the National Institute of Meteorology for the release for postgraduate. In addition, the authors thank the anonymous reviewers for their valuable comments and suggestions.

References

- Alcântara, C.R., Dias, M.A.S., Souza, E.P., Cohen, J.C., 2011. Verification of the role of the low-level jets in Amazon squall lines. *Atmos. Res.* 100 (1), 36–44. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.12.023>.
- Almeida, C.T., Oliveira-Júnior, J.F., Delgado, R.C., Cubo, P., Ramos, M.C., 2017. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *Int. J. Climatol.* 37 (4), 2013–2026. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>.
- Baez-Gonzalez, A.D., Torres-Mezab, M.J., Royo-Marquez, M.H., Kiniryd, J.R., 2018. Climate variability and trends in climate extremes in the priority conservation area El Tokio and adjacent areas in northeastern Mexico. *Weather and Climate Extremes* 22, 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.001>.
- Barnes, S.L., 1973. *Mesoscale Objective Map Analysis Using Weighted Time-Series Observations*, vol. 62. NOAA technical memorandum ERL NSSL.
- Carvalho, G., Barros, A.C., Moutinho, P., Nepstad, D., 2001. Sensitive development could protect Amazonia instead of destroying it. *Nature* 409, 131. <https://doi.org/10.1038/35051794>.
- Carvalho, L.M.V., Jones, C., Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *J. Clim.* 17, 88–108. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<0088:TSACZI>2.0.CO;2).
- Chang, M., Dereczynski, C., Freitas, M.A.V., Cho, S.C., 2014. Climate change index: a proposed methodology for assessing susceptibility to future climatic extremes. *Am. J. Clim. Change* 3, 326–337. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.33029>.
- Coe, M.T., Costa, M.H., Soares-Filho, B.S., 2009. The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *J. Hydrol.* 369, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>.
- Cohen, J.C., Silva Dias, M.A., Nobre, C.A., 1995. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: a case study. *Mon. Weather Rev.* 123 (11), 3163–3174. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3163:ECAWAS>2.0.CO;2).
- Costa, R.L., Baptista, G.M.M., Gomes, H.B., Silva, F.D.S., da Rocha Júnior, R.L., Salvador, M.A., Herdies, D.L., 2020. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes* 28, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>, 2020.
- Da Rocha Júnior, R.L., dos Santos Silva, F.D., Lisboa Costa, R., Barros Gomes, H., Herdies, D.L., Rodrigues da Silva, V.P., Candido Xavier, A., 2019. Analysis of the space-temporal trends of wet conditions in the different rainy seasons of Brazilian northeast by quantile regression and bootstrap test. *Geosciences* 9, 457. <https://doi.org/10.3390/geosciences9110457>.
- Da Silva, M.N.A., Pessoa, F.C.L., Silveira, R.N.P.O., Rocha, G.S., Mesquita, D.A., 2018a. Determinação da homogeneidade e tendência das precipitações na Bacia Hidrográfica do Rio Tapajós. *Revista Brasileira de Meteorologia* 33 (4), 665–675. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334008>.
- Da Silva, P.E., Silva, C.M.S., Spyrides, M.H.C., Andrade, L.M.B., 2018b. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *Int. J. Climatol.* 39 (2), 1–17. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>.
- Da Silva, P.E., Santos e Silva, C.M., Spyrides, M.H.C., Andrade, L.M.B., 2019. Analysis of climate extreme indices in the Northeast Brazil and the Brazilian Amazon in the period from 1980 to 2013. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ* 42 (2), 137–148. https://doi.org/10.11137/2019_2_137_148.
- Daley, R., 1993. *Atmospheric Data Analysis*. N. 2. Cambridge University Press, 1993.
- De Menezes, J.B., Bandeira, O.M., Leite, D.T., 2017. A construção do complexo hidrelétrico de Belo Monte: quarta maior do mundo em capacidade instalada. *Revista Brasileira de Engenharia de Barragens - Edição Especial Belo Monte 5–21*, 04.
- De Quadro, M.F.L., Silva Dias, M.A.F., Herdies, D.L., de Gonçalves, L.G.G., 2012. Análise climatológica da precipitação e do transporte de umidade na região da ZCAS através da nova geração de reanálises. *Revista Brasileira de Meteorologia* 27 (2), 152–162. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000200004>.
- De Souza, E.B., Rocha, E.J.P., 2006. Diurnal variations of rainfall in Bragança-PA (eastern Amazon) during rainy season: mean characteristics and extreme events. *Revista Brasileira de Meteorologia* 21 (3), 142–152.
- De Souza, E.B., Kayano, M.T., Ambrizzi, T., 2005. Intraseasonal and submonthly variability over the eastern Amazon and northeast Brazil during the autumn rainy season. *Theor. Appl. Climatol.* 81, 177–191. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0081-4>.
- De Souza-Júnior, C., Siqueira, J.V., 2013. *ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis*. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR). Foz do Iguaçu-PR, Brazil.
- Dias, L.C.P., Macedo, M.N., Costa, H.C., Coe, M.T., Neill, C., 2015. Effects of land cover change on evapotranspiration and streamflow of small catchments in the Upper Xingu River Basin, Central Brazil. *J. Hydrol.: Reg. Stud.* 4, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.05.010>.
- Dias, V.S., Luz, M.P., Medero, G.M., Nascimento, D.T.F., 2018. An overview of hydropower reservoirs in Brazil: current situation, future perspectives and impacts of climate change. *Water* 10 (592), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w10050592>.
- Dos Reis, L.C., Santos e Silva, C.M., Bezerra, B.G., Mutti, P.R., Spyrides, M.H.C., Da Silva, P.E., 2020. Analysis of Climate Extreme Indices in the MATOPIBA Region, Brazil. *Pure and Applied Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02474-4>.
- Dos Santos, C.A.C., Oliveira, V.G.D., 2017. Trends in extreme climate indices for Pará State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 32 (1), 13–24. <https://doi.org/10.1590/0102-778632120150053>.
- Dos Santos, C.A., Lima, A.M.M., Franco, V.S., Araújo, I.B., Menezes, J.F.G., Gomes, N.M.O., 2016. Distribuição espacial da precipitação na bacia hidrográfica do rio Xingu. *Nucleus* 13 (2), 223–230. <https://doi.org/10.3738/1982.2278.1630>.
- Espinoza, J.C., Ronchail, J., Marengo, A.M., Segura, R., 2019. Contrasting north-south changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dynam.* 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., Michaelson, J., 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- Gallant, A.J.E., Karoly, D.J., Gleason, K.L., 2014. Consistent trends in a modified climate extremes index in the United States, Europe and Australia. *J. Clim.* 27, 1379–1394. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00783.1>.
- Grimm, A.M., 2011. Interannual climate variability in South America: impacts on seasonal precipitation, extreme events and possible effects of climate change. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 25 (4), 537–554. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0420-1>.
- Haylock, M.R., Peterson, T.C., Alves, L.M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y.M.T., Baez, J., Barros, V.R., Berlato, M.A., Bidegain, M., Coronel, G., Corradi, V., Garcia, V.J., Grimm, A.M., Karoly, D., Marengo, J.A., Marino, M.D., Moncunil, D.F., Nechet, D., Quintana, J., Rebello, E., Rusticucci, M., Santos, J.L., Trebejo, I., Vicente, A., 2006. Trends in total and extreme South American rainfall in 1960–2000 and links with sea surface temperature. *J. Clim.* 19, 1490–1512. <https://doi.org/10.1175/JCLI3695.1>.
- IPCC, 2012. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, p. 582.
- Jiménez-Muñoz, J., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrinho, J.A., Van der Schrier, G., 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>.
- Koch, S.E., DesJardins, M., Kocin, P.J., 1983. An interactive Barnes objective map analysis scheme for use with satellite and conventional data. *J. Clim. Appl. Meteorol.* 22 (9), 1487–1503. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1487:AIBOMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1487:AIBOMA>2.0.CO;2).
- Laurance, W.F., Cochrane, M.A., Bergen, S., Fearnside, P.M., Delamónica, P., Barber, C., D'Angelo, S., Fernandes, T., 2001. The future of the Brazilian Amazon. *Science* 291, 438–439. <https://doi.org/10.1126/science.291.5503.438>.
- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *J. Atmos. Sci.* 54 (5), 656–678. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054<0656:OTOOTB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054<0656:OTOOTB>2.0.CO;2).
- Liebmann, B., Marengo, J., 2001. Interannual variability of the rainy season and rainfall in the Brazilian Amazon Basin. *J. Clim.* 14 (22), 4308–4318. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<4308:IVOTRS>2.0.CO;2).
- Liu, J., Shanguan, D., Liu, S., Ding, Y., Wang, S., Wang, X., 2019. Evaluation and comparison of CHIRPS and MSWEP daily-precipitation products in the Qinghai-Tibet Plateau during the period of 1981–2015. *Atmos. Res.* 230, 104634. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104634>.
- Llopart, M., Coppola, E., Giorgi, F., Rocha, R.P., Cuadra, S.V., 2014. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Climatic Change* 125 (1), 111–125. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>.
- Lucas, E.W.M., Sousa, F.A.S., Silva, F.D.S., Lucio, P.S., 2009. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à Região Hidrográfica do Xingu - Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia* 24 (3), 308–322. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000300005>.
- Lucas, E.W.C., Souza, F.A.S., Silva, F.D.S., Soares, L.M., 2019. Performance evaluation gridded precipitation data in the river basin Xingu. VIII Simpósio Internacional de Climatologia. Belém-PA, Brasil.
- MAPBIOMAS, 2019a. Projeto MapBiomass - Coleção [versão 4.0] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil. <http://plataforma.mapbiomas.org/map#coverage>. accessed on 05 August 2019.
- MAPBIOMAS, 2019b. MapBiomass General "Handbook" Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). Collection 4, Version 2.0. https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/ATBD_Collection_4_v2_Dez2019.pdf. accessed on 05 August 2019.

- Marengo, J.A., 2008. Água e mudanças climáticas. *Estud. Avançados* 22 (63), 83–96. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>.
- Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36 (3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/joc.4420>.
- Marengo, J.A., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., Camargo, H., Riveros, M.P., Pablo, A.D., 2013. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in northeast Brazil. *J. Clim.* 26 (22), 9137–9154. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>.
- Marengo, J.A., Souza Jr., C.M., Thonicke, K., Burton, C., Halladay, K., Betts, R.A., Alves, L.M., Soares, W.R., 2018. Changes in climate and land use over the Amazon region: current and future variability and trends. *Front. Earth Sci.* 6 (228), 1–21. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>.
- Norte Energia, 2018. UHE Belo Monte, a Maior Usina Hidrelétrica 100% Brasileira. UHE Belo Monte. <https://www.norteenergiasa.com.br/pt-br/uhe-belo-monte/a-usina>. accessed on 05 August 2019.
- Oliveira, P.T., Santos e Silva, C.M., Lima, K.M., 2016. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 130 (1–2), 77–90. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>.
- Panday, P.K., Coe, M.T., Macedo, M.N., Lefebvre, P., Castanho, A.A., 2015. Deforestation offsets water balance changes due to climate variability in the Xingu River in eastern Amazonia. *J. Hydrol.* 523, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.018>.
- Rolim, P., Santos, D., Rocha, E., 2006. Variabilidade da precipitação na Amazônia: implicações socioeconômicas. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis/SC, Brazil.
- Salvador, M.A., Brito, J.I.B., 2017. Trend of annual temperature and frequency of extreme events in the MATOPIBA region of Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 133, 253–261. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2179-5>.
- Santos, E.B., Lucio, P.S., Santos e Silva, C.M., 2015a. Seasonal analysis of return periods for maximum daily precipitation in the Brazilian Amazon. *J. Hydrometeorol.* 16, 973–984. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0201.1>.
- Santos, E.B., Lucio, P.S., Santos e Silva, C.M., 2015b. Precipitation regionalization of the Brazilian Amazon. *Theor. Appl. Climatol.* 16, 185–192. <https://doi.org/10.1002/asl2.535>.
- Santos, E.B., Lucio, P.S., Santos e Silva, C.M., 2015c. Trend analysis of daily precipitation in the Brazilian Amazon. *Revista Brasileira de Geografia Física* 8, 1041–1052. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20150052>.
- Santos, E.B., Lucio, P.S., Santos e Silva, C.M., 2017. Synoptic patterns of atmospheric circulation associated with intense precipitation events over the Brazilian Amazon. *Theor. Appl. Climatol.* 128, 343–358. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1712-7>.
- Sathler, D., Monte-Mór, R.L., Carvalho, J.A.M.D., Costa, A., 2010. Urban hierarchy in the Brazilian Amazon. *Revista Brasileira de Estudos de População* 27 (2), 251–268. <https://doi.org/10.1590/S0102-30982010000200002>.
- Satyamurty, P., Castro, A.A., Tota, J., Silva Gularte, L.E., Manzi, A.O., 2010. Rainfall trends in the Brazilian Amazon basin in the past eight decades. *Theor. Appl. Climatol.* 99, 139–148. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0133-x>.
- Setegn, S.G., Rayner, D., Melesse, A.M., Dargahi, B., Srinivasan, R., 2011. Impact of climate change on the hydroclimatology of lake Tana basin, Ethiopia. *Water Resour. Res.* 47, 1–13. <https://doi.org/10.1029/2010WR009248>. W04511.
- Silva, J.P., Pereira, D.I., Aguiar, A.M., Rodrigues, C., 2013. Geodiversity assessment of the Xingu drainage basin. *J. Maps* 9 (2), 254–262. <https://doi.org/10.1080/17445647.2013.775085>.
- Silva Junior, C.H.L., Almeida, C.T., Santos, J.R.N., Anderson, O.L., Aragão, L.E.O.C., Silva, F.B., 2018. Spatiotemporal rainfall trends in the Brazilian legal Amazon between the years 1998 and 2015. *Water* 10, 1220. <https://doi.org/10.3390/w10091220>.
- Skansi, M.M., Brunet, M., Sigró, J., Aguilar, E., Groening, J.A.A., Bentancur, O.J., Geier, Y.R.C., Amaya, R.L.C., Jácome, H., Ramos, A.M., Rojas, C.O., Pasten, A.M., Mitro, S.S., Jiménez, C.V., Martínez, R., Alexander, L.V., Jones, P.D., 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global Planet. Change* 100, 295–307. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.
- Stickler, C.M., Coe, M.T., Costa, M.H., Nepstad, D.C., McGrath, D.G., Dias, L.C.P., Rodrigues, H.O., Soares-Filho, B.S., 2013. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proc. Natl. Acad. Sci. Unit. States Am.* 110 (23), 9601–9606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215331110>.
- Tomasella, J., Borma, L.S., Marengo, J.A., Rodriguez, D.A., Cuartas, L.A., Nobre, A.C., Prado, M.C., 2011. The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia: hydrological response in the river main-stem. *Hydrol. Process.* 25 (8), 1228–1242. <https://doi.org/10.1002/hyp.7889>.
- Vieira, S.O., Satyamurty, P., Andreoli, R.V., 2013. On the south atlantic convergence Zone affecting southern amazonia in austral summer. *Atmos. Sci. Lett.* 14, 1–6. <https://doi.org/10.1002/asl2.401>.
- Villar, J.C.E., Guyot, J.L., Ronchail, J., Cochonneau, G., Filizola, N.P., Fraizy, P., Labat, D., Oliveira, E., Ordoñez Gálvez, J.J., Vauchel, P., 2009. Contrasting regional discharge evolutions in the Amazon Basin (1974–2004). *J. Hydrol.* 375, 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.004>.
- Villas-Bóas, A., 2012. De olho na Bacia do Xingu. *Série Cartô Brasil Socioambiental. ISA*, vol. 5. São Paulo.
- Wang, L., Zhi-Jun, Y., Li-Guang, J., Wang, R., Shan-Shan, W., Zhao-Fei, L., 2016. Changes in climate extremes and catastrophic events in the Mongolian Plateau from 1951 to 2012. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 55, 1169–1182. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0282.1>.
- Xavier, A.C., King, C.W., Scanlon, B.R., 2016. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). *Int. J. Climatol.* 36 (6), 2644–2659. <https://doi.org/10.1002/joc.4518>.
- Xu, L., Samanta, A., Costa, M.H., Ganguly, S., Nemani, R.R., Myneni, R.B., 2011. Widespread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought. *Geophys. Res. Lett.* 38 (7), 1–4. <https://doi.org/10.1029/2011GL046824>.
- Zhang, X., Yang, F., 2004. RCLimDex (1.0) User Manual, Climate Research Branch Environment. Ontario, Canada. <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>. accessed on 05 August 2019.
- Zhang, X., Hegerl, G., Zwiers, F.W., Kenyon, J., 2005. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. *J. Clim.* 18 (11), 1641–1651.