



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO ENGENHARIA NAVAL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CAROLINA COSTA RAMOS

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A NAVEGABILIDADE
DO RIO MADEIRA**

Belém - Pará

2025

CAROLINA COSTA RAMOS

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A NAVEGABILIDADE
DO RIO MADEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal do Pará, para obtenção do Título de Mestrado Acadêmico em Engenharia Naval, na área de Transporte Aquaviário.

Área de concentração: Transporte Aquaviário.

Linha de Pesquisa: Transporte e Planejamento Hidroviário.

Orientador: Dr. Valcir Joao Da Cunha Farias

Belém – Pará

2025

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS SOBRE A NAVEGABILIDADE DO RIO MADEIRA

Autora:

CAROLINA COSTA RAMOS

Dissertação submetida a banca examinadora aprovada pelo colegiado do curso de Mestrado de Engenharia Naval do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Naval na área de Transporte Aquaviário.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Valcir João Da Cunha Farias - Orientador

Prof. Dr. Nelio de Moura Figueiredo – Coorientador

Prof. Dr. Pedro Igor Dias Lameira – Membro interno

Prof. Dr. Carlos Eduardo Aguiar de Souza Costa – Membro externo

A minha família que sempre me apoiou.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos e sua presença constante em minha vida. Obrigada por Sua eterna compreensão e tolerância, por Seu infinito amor, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir e por sempre me direcionar para o caminho certo, enfim, obrigado por tudo.

A minha família, meus pais, Oseas e Wayna e meus irmãos, Samuel e Camille, que são meus maiores incentivadores e sem os quais eu jamais poderia está concluindo mais uma etapa da minha vida, obrigada por toda a dedicação, amor e carinho. Amo vocês!

Ao Prof. Marcus Rocha (*in memoriam*), tenho tanto que agradecer ao senhor, seu apoio, sua paciência, sua serenidade, suas orientações no tempo certo. Obrigada por ter-me dado a tranquilidade e confiança quando mais precisei. O senhor foi e sempre será exemplo para todos nós. Serei sempre grata.

Ao meu orientador Prof. Valcir, por toda a compreensão, pela paciência ao meu ajudar a desenvolver o trabalho, por ter me acolhido e me direcionado de forma objetiva para o desenvolvimento desta dissertação. Sem o seu apoio não teria conseguido levar em frente o meu mestrado.

Aos meus amigos do LANO, que estiveram que estiveram ao meu lado, seja com palavras de incentivo, com boas risadas para aliviar o peso das responsabilidades, muito obrigada!

A Nayrama, secretária da pós-graduação, sua amizade foi fundamental para que eu mantivesse o equilíbrio e a motivação durante este percurso. Agradeço pela confiança, apoio e, acima de tudo, pela presença constante, mesmo nos dias mais difíceis.

A meus amigos e familiares, obrigada pelo companheirismo e apoio incondicional que tornaram essa caminhada mais leve. Sou profundamente grata por ter vocês ao meu lado, não apenas neste momento, mas na vida toda.

À CAPES, que financiou esta pesquisa e colabora constantemente para o desenvolvimento científico do nosso país.

Não andem ansiosos por coisa alguma, mas em tudo, pela oração e súplicas, e com ação de graças, apresentem seus pedidos a Deus.

Filipenses 4:6

RESUMO

Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes alterações nos padrões climáticos, entender e prever as mudanças climáticas é de extrema importância para a tomada de decisões e formulação de políticas eficazes de mitigação e adaptação. Nos últimos anos o aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas e enchentes produziram prejuízos e danos no meio ambiente, aos recursos hídricos, a economia e as cidades e comunidades que vivem às margens dos rios. É no contexto desta vulnerabilidade regional às mudanças do clima e às incertezas decorrentes destas mudanças que se insere este trabalho. Tendo como objetivo avaliar os potenciais efeitos das mudanças climáticas nos níveis d'água e na navegabilidade do rio Madeira e as consequências sobre a economia da região. Foram desenvolvidas redes neurais artificiais utilizando a arquitetura *multilayer perceptron* com o algoritmo feedforward backpropagation. Foram realizados 2 cenários de testes, o cenário SSP1-2.6 apresenta emissões reduzidas de gases do efeito estufa (GEE), enquanto que o cenário SSP5-8.5 exibe emissões mais intensas. As entradas das RNA's são constituídas por dados de precipitação, temperatura, umidade e cota (nível d'água) do trecho de Porto velho a Humaitá. Já a saída da rede é composta pela previsão de cota da estação de Humaitá para o período de 2025 a 2030. O cenário 1 (SSP1-2.6) apresentou uma variação dos valores de cota de aproximadamente 800 cm a 1500 cm para o período projetado de 2025 a 2030. Enquanto, o cenário 2 (SSP5-8.5) os valores de cota variaram de 800 cm a 2400 cm. No cenário SSP1-2.6 a variação no nível d'água do Rio Madeira foi mais moderada, enquanto que o cenário SSP5-8.5 apresentaram maiores níveis d'água. Os resultados reforçam a necessidade de planejamento e adaptação do setor hidroviário diante das mudanças climáticas. Estratégias como monitoramento contínuo dos níveis d'água, aprimoramento da infraestrutura portuária e desenvolvimento de políticas de mitigação podem contribuir para a resiliência do transporte aquaviário na região.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Hidrovias; Transporte Aquaviário; Rede Neural.

ABSTRACT

With the increase in greenhouse gas emissions and the consequent changes in weather patterns, understanding and predicting climate change is of utmost importance for decision-making and formulation of effective mitigation and adaptation policies. In recent years, the increase in the frequency and intensity of drought and flood events has caused damage to the environment, water resources, the economy, and cities and communities living along riverbanks. This work is part of the context of this regional vulnerability to climate change and the uncertainties arising from these changes. The aim of this study is to evaluate the potential effects of climate change on water levels and navigability of the Madeira River and the consequences for the region's economy. Artificial neural networks were developed using the multilayer perceptron architecture with the feedforward backpropagation algorithm. Two test scenarios were performed: scenario SSP1-2.6 presents reduced greenhouse gas (GHG) emissions, while scenario SSP5-8.5 exhibits more intense emissions. The ANN inputs consist of precipitation, temperature, humidity and water level data from the stretch between Porto Velho and Humaitá. The network output consists of the predicted water level for the Humaitá station for the period 2025 to 2030. Scenario 1 (SSP1-2.6) presented a variation in water level values of approximately 800 cm to 1500 cm for the projected period from 2025 to 2030. Meanwhile, scenario 2 (SSP5-8.5) showed water level values ranging from 800 cm to 2400 cm. In scenario SSP1-2.6, the variation in the water level of the Madeira River was more moderate, while scenario SSP5-8.5 presented higher water levels. The results reinforce the need for planning and adaptation of the waterway sector in the face of climate change. Strategies such as continuous monitoring of water levels, improvement of port infrastructure and development of mitigation policies can contribute to the resilience of waterway transport in the region.

Key words: Climate change; Waterways; Water Transport; Neural Network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Emissões de CO ² dos cinco principais cenários SSPs em GtCO ² /ano.	23
Figura 2 .Condições de circulação atmosférica no Oceano Pacífico: condição neutra (1), condições de El nino (2) e condições de La nina (3) respectivamente.	26
Figura 3. Localização das partes do Pacífico tropical usadas para monitorar a temperatura da superfície do mar. A temperatura da superfície do mar na região Niño3.4, abrangendo de 120°W a 170°W de longitude.	28
Figura 4. Seca no rio Solimões com comunidades isoladas.	31
Figura 5. Imagem de satélite comparando rio Amazonas nos anos de 2022 e 2023.	32
Figura 6. Cheia do rio Madeira afetando o tráfego na BR 364.	33
Figura 7. Enchente do rio na cidade de Envira em 2021.....	34
Figura 8. Mapa do trecho navegável do rio Madeira.	37
Figura 9. Barcaça utilizada no transporte de grãos no rio Madeira.	38
Figura 10. Empurrador e comboio de barcaças.	39
Figura 11. Principais pontos críticos para a navegação na hidrovia do rio Madeira.	40
Figura 12. Morfologia fluvial temporal da Ilha Curicacas.....	41
Figura 13. Estrutura de um neurônio artificial.....	46
Figura 14. Rede Perceptron Multicamadas	48
Figura 15. Area de Estudo.....	53
Figura 16. Embarcação-tipo do rio Madeira	57
Figura 17. Fluxograma da metodologia aplicada.....	60
Figura 18. Projeção cota (nível) para o cenário SSP1-2.6.	61
Figura 19. Projeção cota (nível) para o cenário SSP5-8.5	62
Figura 20. Projeção do cenário SSP1-2.6 para os anos de 2025 a 2030.....	64
Figura 26. Projeção do cenário SSP5-8.5 para os anos de 2025 a 2030.....	Erro!

Indicador não definido.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese dos cenários de emissão	24
Tabela 2. Informações utilizadas para definir os critérios das projeções climáticas para a área de estudo.....	56
Tabela 3. Características do comboio.	57

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANTAQ	Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANA	Agência Nacional de Águas
BPBES	Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecosistêmicos
CMIP5	<i>Coupled Model Intercomparison Program</i> Versão 5
CMIP6	<i>Coupled Model Intercomparison Program</i> Versão 6
CHIRPS	Precipitação Infravermelha do Grupo de Riscos Climáticos com Dados de Estação
CFC's	Clorofluorcarbonetos
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DA	Dipolo do Atlântico
ENOS	El Niño Oscilação Sul
GEE's	Gases de Efeito Estufa
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ION	Índice Oceânico de Niño
MAE	Erro Médio Absoluto
MCGs	Modelos Climáticos Globais
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações
MLP	Multi-Layer Perceptron
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ODA	Oscilação Decadal do Atlântico
ONU	Organização das Nações Unidas
OMM	Organização Meteorológica Mundial
PADMA	Plano de Dragagem de Manutenção Aquaviária do Rio Madeira
PDZ	Plano de Desenvolvimento e Zoneamento
PMH	Plano de Monitoramento Hidrográfico
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
RNAs	Redes Neurais Artificiais
RMSE	Erro Quadrático Médio
R ²	Coefficiente de determinação

RCP	Representative Concentration Pathways
SSPs	Caminhos Socioeconômicos Compartilhados
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	17
1.2 Objetivo	18
1.2.1 Geral	18
1.2.2 Específico	18
1.3 Organização do trabalho	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Mudanças Climáticas	20
2.1.1 Fenômenos climáticos e eventos extremos	25
2.1.2 Eventos extremos na Amazônia	30
2.1.3 Influência climática nos rios Amazônicos	35
2.2 Transporte de cargas e navegação no rio Madeira	36
2.3 Previsão Hidrológica	42
2.4 Redes Neurais	45
2.4.1 Funcionamento de uma rede neural artificial	45
2.4.3 Redes <i>perceptrons</i> de múltiplas camadas (MLP)	47
2.4.2 Funções de Ativação	49
2.4.4 Treinamento e aprendizagem das RNA's	49
2.5 Avaliação de desempenho	51
2.5.1 Erro Quadrático Médio (RMSE)	51
2.5.2 MAE – Erro Médio Absoluto	51
2.5.3 R ² – Coeficiente de determinação	52
3 METODOLOGIA DA PESQUISA	53
3.1 Caracterização da área de estudo	53
3.2 Aquisição de dados	55
3.2.3 Embarcação-tipo, base cartográfica e nível d'água	57
3.3 Processamento de dados	58
	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
4.1 Níveis D'água Simulados	61
4.2 Comparação entre os Cenários futuros SSP1- 2.6 e SSP5-8.5	63
5. CONCLUSÃO	67
REFERENCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são um dos desafios mais urgentes enfrentados pela sociedade atualmente. Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes alterações nos padrões climáticos, entender e prever as mudanças climáticas é de extrema importância para a tomada de decisões e formulação de políticas eficazes de mitigação e adaptação. Segundo Tucci (2005), os modelos de previsão hidrológica podem oferecer auxílio em um sistema de alerta de inundações, na tomada de decisão para operações de barragens ou mesmo para determinação de níveis de navegação em uma região.

As previsões hidrológicas para a Bacia Amazônica foram avaliadas na literatura utilizando diferentes cenários climáticos e hidrológicos. Um estudo realizado por Monteiro *et al.*, (2024) apresentou a modelagem estatística hidrológica da bacia do rio Tocantins considerando de forma simplificada os processos que compõe o ciclo hidrológico. A modelagem foi realizada através de Regressão Linear Múltipla, utilizando a informação de precipitação na área de estudo e a vazão de entrada na bacia como variáveis explicativas para a vazão no exutório da bacia. A partir dessa metodologia e da análise dos resultados, o modelo provou-se eficiente para a estimativa da vazão a partir de dados de precipitação prevista por hidro estimadores.

Previsões para a bacia do Rio Madeira (Gomes *et al.*, 2020) utilizando o Modelo Regional Eta e o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB) avaliaram os impactos do aumento dos GEEs (cenário RCP 8.5) e dos desflorestamentos no ciclo da água, o modelo apresentou sensibilidade sobre toda a bacia do Madeira, com alterações significativas na temperatura, precipitação e vazão. Essas alterações nas descargas e na área de inundação podem ter efeitos negativos, com prejuízos e danos ao meio ambiente, nos recursos hídricos, nos principais setores da economia, afetando de forma direta as comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis.

As alterações climáticas deverão influenciar a intensificação de eventos extremos nas próximas décadas, como cheias e secas. Contudo, a sensibilidade climática varia largamente entre bacias, afetadas por características da superfície e escala da bacia e as previsões utilizando redes neurais artificiais (RNAs) têm se mostrado ferramentas promissoras para abordar algumas das complexas questões relacionadas às mudanças climáticas.

Mendonça (2021) realizou simulações do fenômeno de conversão de chuvas em vazões de uma Sub-bacia Hidrográfica do Rio Guamá (SHRG) no Estado do Pará, Amazônia com os modelos são baseados em RNAs de arquiteturas MLP (Multilayer Perceptron) e NARX (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs), os resultados mostram a possibilidade da simulação de vazões de pequenas e médias bacias hidrográficas da Amazônia através da combinação de RNAs NARXs, principalmente bacias com ausência ou limitação de dados chuva-vazão.

Borges *et al.*, (2021) analisou a correlação entre dados de nível de água de estações no Rio Tapajós com as variáveis climáticas ENOS (relacionadas aos eventos de El Niño e La Niña). Foi desenvolvido um modelo de previsão utilizando uma rede neural multicamadas do tipo perceptron, utilizando 30 anos de séries históricas de nível d'água. A partir dos resultados pode-se fazer uma análise da previsão para entender o comportamento hidrológico e a avaliação do desempenho da rede erros utilizando o RSME e R^2 .

De Souza Costa *et al.*, (2021) analisou as variações futuras nos volumes e curvas de duração da vazão do Rio Amazonas para verificar a resposta hidrológica às mudanças climáticas. Os dados de vazão futura foram gerados para os cenários Representative Concentration Pathways (RCPs) 6.0 e 8.5 do modelo hidrológico global WaterGAP2 forçado pelos modelos de circulação geral MIROC5 e HadGEM2-ES, obtidos da plataforma InterSectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP). As curvas de duração do fluxo dos períodos base foram criadas a partir dos últimos 20 anos de dados observados para cada estação de medição de vazão, bem como as curvas do período base simulado (2000–2019), para comparar com as curvas de cenários futuros (a partir de 2020). Para uma análise mais pontual, os volumes decadais também foram

analisados. O WaterGAP2 foi eficiente, apresentando a classificação “muito bom” para a maioria das estações analisadas de acordo com os indicadores estatísticos adotados. A maioria dos fluxos extremos foi observada de 2080 a 2099. Para o WaterGAP2 (MIROC5), na maioria das estações, os volumes ficaram abaixo da média decadal esperada para o século geralmente de 2020 a 2059. Aumentando novamente após 2060 para as projeções do WaterGAP2 (HadGEM2-ES), os volumes geralmente ficam próximos ou abaixo da média decadal, com uma diminuição a partir de 2060 (geralmente para RCP 8.5).

Figueiredo; Blanco (2019) apresentaram uma análise de modelos RNA (Redes Neurais Artificiais), tipo MLP (*Multilayers Perceptron*) na previsão de níveis de água mensais e de condições de navegabilidade, com antecedência de vinte e quatro meses, na bacia do rio Tapajós. Foi usada uma MLP com quatro neurônios na camada de entrada, doze camadas escondidas e uma camada de saída, onde os pesos iniciais foram gerados aleatoriamente. Como funções de transferência foram usadas funções sigmóides na camada escondida e a função linear na camada de saída. O teste da rede, foi realizado do período de 2006 a 2008. Como resultado das análises observou-se que o modelo RNA apresentou R^2 médio igual 0,971 e erro quadrático médio RMSE da ordem de 0,008. Com base nos resultados dessa pesquisa foram geradas ferramentas que permitiram a análise de condições de navegabilidade e o dimensionamento de obras de infraestrutura hidroviárias.

No que diz respeito à região de interesse desse estudo, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu sexto ciclo de avaliação (AR6), lançado em março de 2023, das mudanças climáticas, aponta aumento de temperatura com consequentes impactos nos regimes de chuvas e vazão dos rios da Amazônia. Segundo Marengo (2023), nos últimos 30 anos, têm aumentado a ocorrência de eventos climáticos extremos na região, com aumento na frequência de chuvas fortes e períodos de estiagem mais prolongados. É no contexto desta vulnerabilidade regional às mudanças do clima e às incertezas decorrentes destas mudanças que se insere este trabalho. Tendo como objetivo avaliar os potenciais efeitos das mudanças climáticas na navegabilidade do rio Madeira e as consequências sobre a economia da região.

1.1 Justificativa

A bacia do rio Madeira desempenha papel fundamental no desenvolvimento social e econômico da região através da navegação (transporte de passageiros e cargas) e a produção de energia elétrica por meio das usinas de Jirau e Santo Antônio (ANTAQ, 2024). Entretanto, as mudanças e variabilidade no clima tem afetado a dinâmica fluvial dos principais rios da Bacia Amazônica, principalmente a do rio Madeira (Marengo *et al.*, 2016; Vergasta *et al.*, 2023). Nos últimos anos o aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas e enchentes produziram prejuízos e danos no meio ambiente, aos recursos hídricos, a economia e as cidades e comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis na Amazônia (Espinoza *et al.*, 2019; Bredâ *et al.*, 2020; Souza *et al.*, 2020; Caldatto *et al.*, 2024).

A Hidrovia é uma das principais vias de escoamento de commodities, especialmente grãos provenientes da região Centro-Oeste, operando como uma via alternativa para a desconcentração das exportações pelos portos do Sudeste e Sul (Araldi, 2023). No entanto, enfrenta desafios operacionais significativos, como a sazonalidade dos níveis d'água, infraestrutura inadequada, falta de dragagem contínua e ausência de investimentos em modernização. A hidrovia é tipicamente sazonal, variável conforme a estação climática predominante. Durante a estiagem, há a formação de bancos de areia, que impedem o tráfego nos canais preferenciais de navegação. Além disso, aumentam os riscos de acidentes a embarcações (Lopes; Magalhães, 2018).

Em 2023, a movimentação de cargas na hidrovia representou 10,7 milhões de toneladas (ANTAQ, 2024). Esse volume de carga transportada tem um potencial ainda maior, a partir de investimentos para aumentar a eficiência do transporte de cargas e, conseqüentemente, fortalecer a posição da região no comércio exterior.

Esta pesquisa, contribui, assim, para o desenvolvimento econômico e social da região, oferecendo subsídios técnicos para futuras políticas públicas e investimentos na infraestrutura hidroviária.

1.2 Objetivo

1.2.1 Geral

Análise da previsão de níveis de água e das condições de navegabilidade por meio de rede neural *perceptron* multicamadas no rio Madeira.

1.2.2 Específico

Para atender o objetivo geral desta pesquisa, foi definido um conjunto de objetivos específicos a serem alcançados:

- Análise e fundamentação do modelo computacional baseado em rede neural artificial de previsão de níveis do Rio Madeira;
- Análise da influência nos níveis do Rio Madeira em relação as variáveis climáticas de precipitação, temperatura, umidade;
- Avaliar a influência dos cenários climáticos sobre a cota (nível) do Rio Madeira.

1.3 Organização do trabalho

A dissertação está estruturada em 6 capítulos:

Capítulo 1: Introdução do tema da dissertação, justificativa, e o objetivo geral e objetivos específicos definidos. Capítulo 2. Revisão da literatura sobre mudanças climáticas e previsões hidrológicas. Na segunda parte, são apresentados conceitos dos métodos utilizados para o desenvolvimento do trabalho. Capítulo 3. Apresenta a metodologia aplicada, abordando os detalhes da base de dados das séries de tempo utilizadas e o pré-processamento a que foram submetidas. Capítulo 4. Apresenta os resultados e análises obtidos com as simulações. Capítulo 5. Apresenta as conclusões da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mudanças Climáticas

As mudanças climáticas globais (ODS 13 da Agenda 2030 da ONU), tem sido amplamente debatido principalmente durante as duas últimas décadas sendo foco de diversos estudos científicos e relatórios direcionados para tomadores de decisão como aqueles elaborados Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que vem sinalizando que o combate à crise climática requer o alcance das metas estabelecidas no Acordo de Paris de manter o aquecimento global abaixo de 2°C, possivelmente menor de 1,5°C para redução de riscos. (Magnan *et al.*, 2021; Pedersen *et al.*, 2021; IPCC, 2023).

O IPCC, foi criado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (ONU Meio Ambiente) e pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) em 1988 com o objetivo de fornecer aos formuladores de políticas avaliações científicas regulares sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como para propor opções de adaptação e mitigação (MCTI, 2022). O Relatório Síntese do Sexto Ciclo de Avaliação (AR6) do IPCC, lançado em março de 2023, nas versões do relatório completo (*Longer Report*) e Sumário para Formuladores de Políticas (*Summary for Policymakers - SPM*), concentra as principais informações sobre as mudanças globais do clima.

A mudança climática, definida pelo IPCC, refere-se a qualquer mudança do clima ao longo do tempo, seja devido à variabilidade natural ou como resultado da atividade humana. Esse uso difere daquele da Convenção Quadro sobre Mudanças Climáticas, onde a mudança climática é atribuída direta ou indiretamente à atividade humana que altera a composição da atmosfera do planeta e que se soma à variabilidade climática natural observada ao longo de períodos de tempo comparáveis (PBMC/BPBES, 2018). Essa variabilidade natural do clima está relacionada a fatores como a deriva dos continentes, as variações da quantidade de radiação solar que chega a Terra, as variações dos seus parâmetros orbitais, a quantidade de aerossóis naturais (provenientes de fontes minerais, incêndios florestais de origem natural e o sal marinho), as

erupções vulcânicas e fenômenos climáticos que podem modificar o clima localmente, tais como: furacões, tempestades violentas e os fenômenos *El Niño* e *La Niña* (De Albuquerque Cavalcanti e Fonseca, 2021).

Enquanto as alterações climáticas atribuídas as atividades humanas estão associadas a queima de combustíveis fósseis (derivados do petróleo, carvão mineral e gás natural) para geração de energia, atividades industriais e transportes, queimadas, desmatamento e agropecuária. A partir do final do século XIX e no século XX há aumento significativo da produção industrial e da quantidade de poluentes na atmosfera, sobretudo nos últimos 70 anos, principalmente dos gases estufa, tais como o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e os óxidos de nitrogênio (Nox) e, portanto, a intensificação do efeito estufa. Com isso, há também um crescente aumento da temperatura média, o chamado aquecimento global (Fawzy *et al.*, 2020; Jeffrey *et al.*, 2021).

Com o avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, espera-se cada vez mais à diminuição dessas incertezas nas projeções da mudança climática global. No entanto, até que isso se concretize uma das principais estratégias atualmente adotada é utilizar vários cenários de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e diferentes modelos climáticos. Essa combinação é denominada de cenário climático.

Os modelos climáticos estão em constante atualização, pois grupos interdisciplinares em diferentes centros de pesquisa aprimoram a resolução espacial, incorporam novos processos físicos e ciclos biogeoquímicos. As atualizações são coordenadas de acordo com o cronograma dos relatórios de avaliação do IPCC, divulgando um conjunto de resultados de modelos – conhecidos como “rodadas” (IPCC, 2023; Artaxo, 2023). Esses esforços coordenados fazem parte dos Projetos de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP). O objetivo do CMIP é gerar um conjunto de simulações padrão que cada modelo irá executar. Isso permite que os resultados sejam diretamente comparáveis em diferentes modelos, para ver onde eles concordam e discordam sobre mudanças futuras. Um dos principais conjuntos de simulações executadas pelos modelos são os cenários climáticos futuros, onde os modelos recebem um conjunto comum de concentrações futuras de gases de

efeito estufa, aerossóis e outras forças climáticas para projetar o que pode acontecer no futuro.

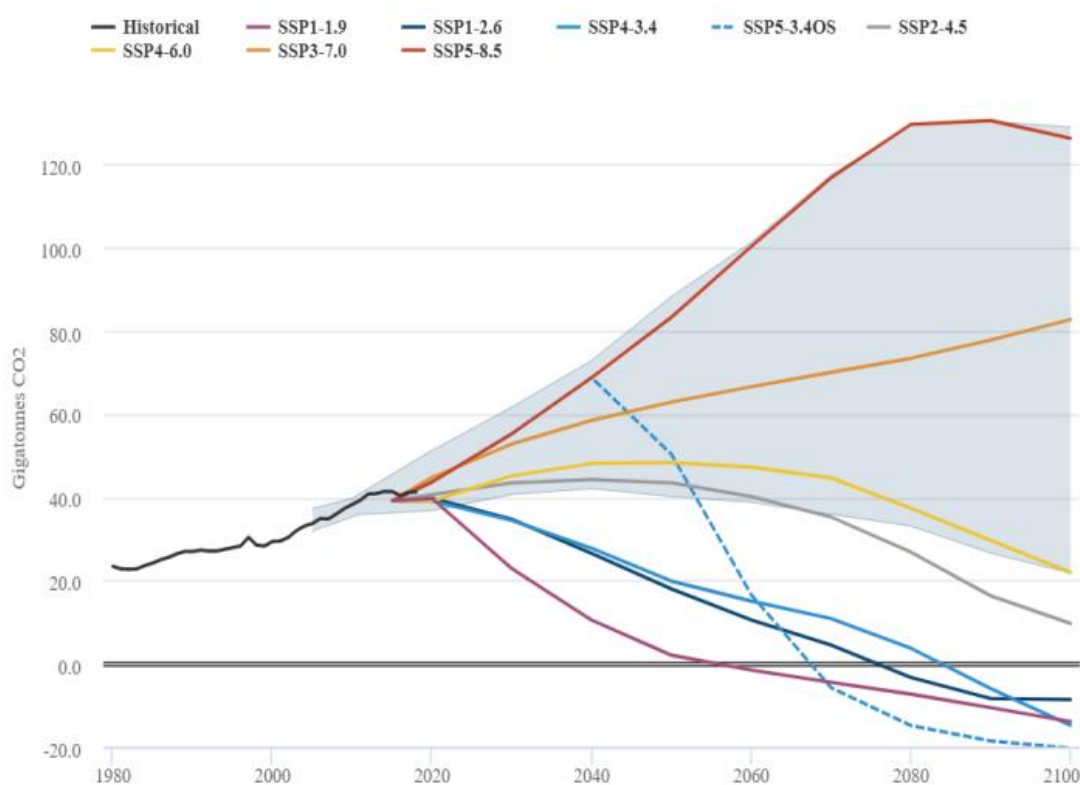
O quinto relatório de avaliação do IPCC de 2013 (AR5) apresentou modelos climáticos do CMIP5, enquanto o relatório de avaliação do IPCC de 2021 (AR6) apresentou novos modelos CMIP6 (IPCC, 2013; IPCC, 2023). Para o desenvolvimento dos novos cenários para o AR5, foram criados os chamados RCPs (Representative Concentration Pathways), que servem como entrada para modelagem climática e química atmosférica nos experimentos numéricos do CMIP5. Os RCPs recebem seus nomes a partir dos níveis das forçantes radiativas, conforme relatado por cada equipe de modelagem elaboradora de cada RCP. Assim, RCP-X implica em um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ou de pico ou ao final do século XXI corresponde a $X \text{ W.m}^{-2}$. O cenário RCP4.5, por exemplo, pressupõe que a forçante radiativa estabiliza pouco depois de 2100, sem ultrapassar o nível de radiação a longo prazo de $4,5 \text{ W/m}^2$. Essa projeção é consistente com a estabilização da demanda energética mundial, programas de reflorestamento fortes e políticas climáticas rigorosas. Além disso, sugere uma estabilização das emissões de metano associadas um leve aumento das emissões de CO_2 até 2040 até atingir o valor alvo de 650 ppm de CO_2 equivalente na segunda metade do século XXI. Já o cenário RCP8.5 sugere um crescimento contínuo da população associada a um desenvolvimento tecnológico lento, resultando em acentuadas emissões de dióxido de carbono. Este cenário é considerado o mais pessimista para o século XXI em termos de emissões de gases do efeito de estufa, sendo consistente com nenhuma mudança política para reduzir as emissões e forte dependência de combustíveis fósseis (Zhou, 2020; ANA, 2024)

O CMIP6 representa uma expansão substancial em relação ao CMIP5, em termos do número de grupos de modelagem participantes, do número de cenários futuros examinados e do número de diferentes experimentos realizados. O CMIP6 consiste nas “rodadas” de cerca de 100 modelos climáticos diferentes sendo produzidos por cerca de 50 grupos de modelagem espalhados pelo mundo. Na preparação para o IPCC AR6, a comunidade de modelagem de energia desenvolveu um novo conjunto de cenários de emissões impulsionados

por diferentes pressupostos socioeconômicos, denominados de “Caminhos Socioeconômicos Compartilhados” (SSPs) (IPCC, 2023).

O IPCC AR5 apresentou quatro caminhos RCPs que examinaram diferentes possíveis emissões futuras de gases de efeito estufa. Esses cenários – RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 e RCP8.5 – têm novas versões no CMIP6. Esses cenários atualizados são chamados de SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP4-6.0 e SSP5-8.5, cada um dos quais resulta em níveis de forçantes radiativas semelhantes em 2100 como seu predecessor no AR5 (Tabela 1). Vários novos cenários também foram considerados para o CMIP6, a fim de fornecer uma seleção mais ampla de futuros para os cientistas simularem. O CMIP6 adicionou um novo cenário – SSP3-7.0 – que fica bem no meio da faixa de resultados da linha de base produzidos pelos modelos de energia. Agora, os pesquisadores podem examinar os resultados do pior caso (SSP5-8.5), do meio do caminho (SSP3-7.0) e os mais otimistas (SSP4-6.0) (Zhou, 2020; Tebaldi *et al.*, 2020; Meinshausen *et al.*, 2020).

Figura 1. Emissões de CO² dos cinco principais cenários SSPs em GtCO²/ano.



Fonte: Adaptada de IPCC 2021.

Uma grande melhoria nos cenários do CMIP6 é uma melhor exploração dos possíveis resultados da linha de base “sem nenhuma política climática”. A geração anterior de modelos climáticos apresentados no CMIP5 incluía apenas um cenário de linha de base muito alto (RCP8.5) e um cenário de mitigação relativamente pequeno consistente com os resultados de linha de base (RCP6.0) (Hermans *et al.*, 2021).

. Embora no CMIP6 tenha havido uma melhoria dos modelos em relação ao CMIP5, os modelos climáticos globais (MCGs), de um modo geral, ainda fornecem projeções de clima em escalas espaciais mundiais ou continentais com uma resolução que não corresponde às necessidades exigidas, por exemplo, no âmbito de planos de adaptação de recursos hídricos regional ou setorial (Parsons, 2020). Devido às limitações computacionais e de dados, a resolução desses MCGs é normalmente maior que 100 km, o que limita consideravelmente a sua capacidade de capturar detalhes espaciais nos padrões climáticos necessários ou desejados nas análises regionais ou locais (ANA, 2024).

Tabela 1. Síntese dos cenários de emissão

Cenário (SSP-RCP)	Cenário Socioeconômico	Aquecimento (2081-2100) (faixa provável)
1-1.9	Sustentabilidade: As emissões são reduzidas de forma rápida, sendo reduzidas a zero por volta de 2050	1,4 °C (1,0 – 1,8 °C)
1-2.6	Sustentabilidade gradual: Emissões são reduzidas de forma lenta, chegando a zero por volta de 2075.	1,8 °C (1,3 – 2,4 °C)
2-4.5	Meio do Caminho: Emissões do nível atual até 2050, depois caindo, mas não atingindo emissões zero até 2100.	2,7 °C (2,1 – 3,5 °C)

3-7.0	Competição regional: Emissões dobram até 2100 fruto da concentração dos países em questões domésticas ou regionais	3,6 °C (2,8 – 4,6 °C)
5-8.5	Desenvolvimento movido a combustíveis fósseis: Intensa utilização de fontes fósseis, com emissões triplicando até 2075.	4,4 °C (3,3 – 5,7 °C)

Fonte: Adaptado ANA (2024)

Hoje existe um crescente consenso na comunidade científica, refletido, por exemplo, nas análises sistemáticas do IPCC, de que o aquecimento global observado nos últimos 120 anos é explicado pelas emissões antropogênicas dos Gases de Efeito Estufa – GEE (principalmente, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, CFCs) e de aerossóis, e não por eventual variabilidade natural do clima (IPCC, 2023). Na verdade, muitos cientistas enxergam inúmeras evidências apontando não mais para a possibilidade de o planeta enfrentar futuras mudanças no clima, mas indicando que já estaríamos vivendo a era das mudanças climáticas resultantes do aquecimento global.

2.1.1 Fenômenos climáticos e eventos extremos

Os eventos de secas e enchentes fazem parte da variabilidade natural da bacia Amazônica, todavia, nas últimas décadas têm se observado mudanças e variações extremas no clima e na hidrologia da bacia (Marengo; Espinoza, 2016; Espinoza *et al.*, 2019).

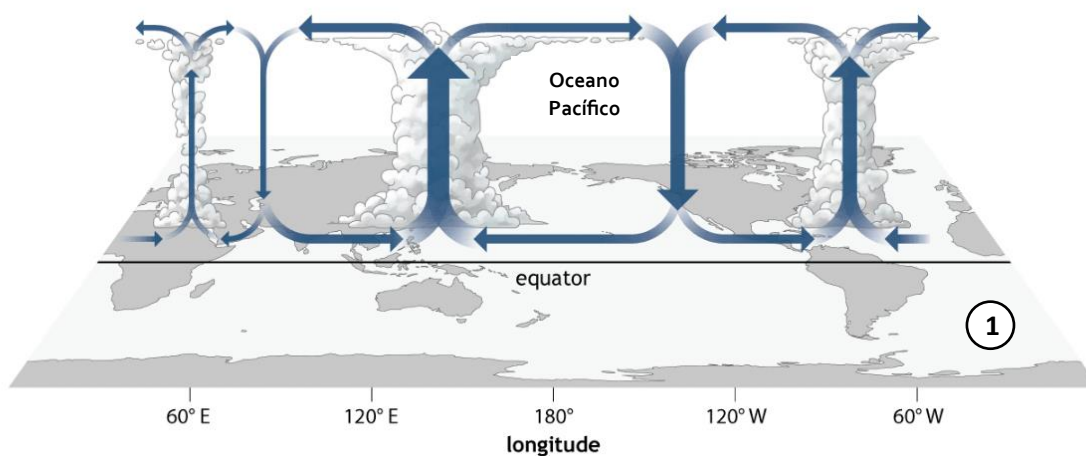
Esses cenários são frequentemente atribuídos a alterações em larga escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), e as temperaturas anômalas da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico tropical (Reboita *et al.*, 2021; Silva, 2022; Cevalho *et al.*, 2024).

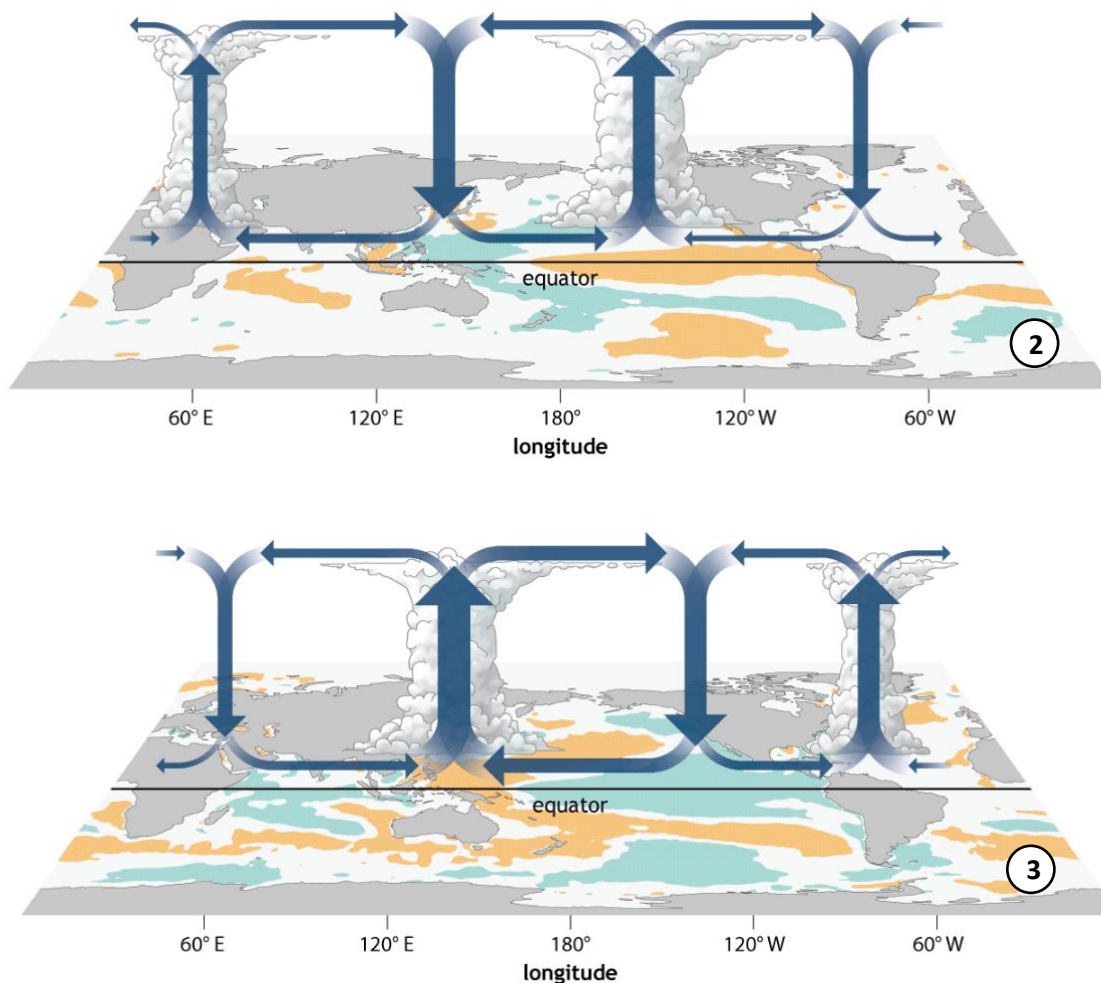
El Niño e a Oscilação Sul (ENOS) é uma flutuação periódica na temperatura da superfície do mar (*El Niño*) e na pressão do ar da atmosfera sobrejacente (Oscilação Sul) através do Oceano Pacífico equatorial. A Oscilação Sul descreve uma variação bimodal na pressão barométrica do nível do mar entre estações de observação em Darwin, Austrália e Taiti. Ela é quantificada no

Índice de Oscilação Sul (SOI) que é uma diferença padronizada entre as duas pressões barométricas. Normalmente, a pressão mais baixa sobre Darwin e a pressão mais alta sobre o Taiti estimulam uma circulação de ar de leste a oeste, atraindo água quente da superfície para oeste e trazendo precipitação para a Austrália e o Pacífico ocidental. Quando a diferença de pressão enfraquece, o que é fortemente coincidente com as condições do *El Niño*, partes do Pacífico ocidental, como a Austrália, sofrem seca severa, enquanto do outro lado do oceano, precipitação intensa pode trazer inundações para a costa oeste da América do Sul equatorial (Cptec/INPE, 2024) (Figura 1).

Embora as causas exatas de início de um evento ENOS quente ou frio não sejam totalmente compreendidas, os dois componentes do ENOS – temperatura da superfície do mar e pressão atmosférica estão fortemente relacionados. Durante um evento *El Niño*, os ventos alísios de leste que convergem através do Pacífico equatorial enfraquecem. Isso, por sua vez, desacelera a corrente oceânica que atrai a água da superfície para longe da costa oeste da América do Sul e reduz a ressurgência de água fria e rica em nutrientes do oceano mais profundo, achatando a termoclina e permitindo que a água quente da superfície se acumule na parte leste da bacia.

Figura 2 .Condições de circulação atmosférica no Oceano Pacífico: condição neutra (1), condições de El nino (2) e condições de La nina (3) respectivamente.





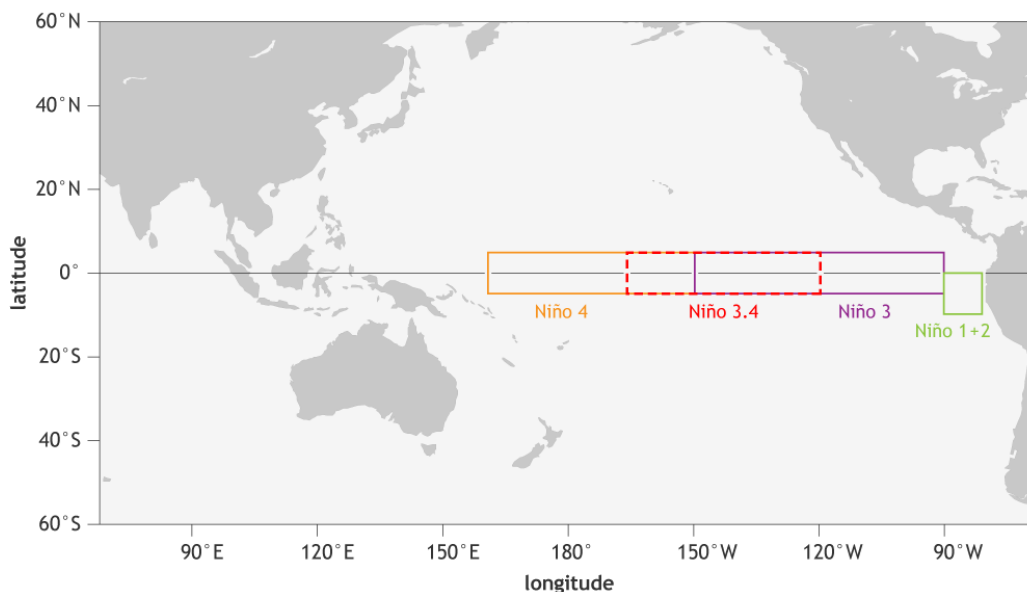
Fonte: NOAA Climate.gov

<https://www.climate.gov/media/16090>

O monitoramento das condições do ENOS concentra-se principalmente nas anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) em 4 regiões geográficas do Pacífico equatorial (Figura 2). Anomalias de TSM iguais ou maiores que $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na região Niño 3.4 são indicativas de condições de fase quente do ENOS (El Niño), enquanto anomalias menores ou iguais a $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ são associadas a condições de fase fria (La Niña). Para a determinação dos valores das anomalias são calculadas as diferenças entre a TSM observada e a média histórica ou climatológica para o mesmo período. Essa média histórica é geralmente baseada em um período de referência de 30 anos (comumente de 1981 a 2010). As anomalias diárias ou semanais da TSM na região Niño 3.4 são então suavizadas por meio de uma média móvel de três meses. Esse passo é importante para filtrar variações de curto prazo e focar em tendências mais

duradouras, resultando na média trimestral de anomalias e esse valor é chamado de Índice Oceânico de Niño (ION). Se o ION exibir condições de fase quente ou fria por pelo menos cinco meses consecutivos, ele se torna oficialmente um evento El Niño ou La Niña (PMEL, 2024).

Figura 3. Localização das partes do Pacífico tropical usadas para monitorar a temperatura da superfície do mar. A temperatura da superfície do mar na região Niño3.4, abrangendo de 120°W a 170°W de longitude.



Fonte: NOAA Climate.gov

Estudos recentes analisaram as principais influências do *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS), na bacia amazônica, Towner *et al.*, (2021) avaliou dados de vazão fluvial do *Global Flood Awareness System* (GloFAS 2.1) e dados observados em 58 estações de medição para examinar se as fases positivas ou negativas de vários índices do Pacífico e do Atlântico alteram significativamente as características dos fluxos fluviais em toda a bacia amazônica (1979–2015). Os resultados mostram mudanças significativas na magnitude e na duração das inundações, particularmente no nordeste da Amazônia para fases negativas de *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) quando a anomalia da temperatura da superfície do mar (TSM) está posicionada no Pacífico tropical central. Esses resultados têm implicações importantes para os setores social e físico que trabalham para a melhoria dos sistemas alerta de inundações.

De Souza *et al.*, (2020) investigou a frequência de eventos extremos de precipitação na maior sub-bacia amazônica, a bacia do rio Madeira, usando informações do conjunto de dados de precipitação de 36 anos do sistema de monitoramento CHIRPS, os resultados da avaliação de tendências mostraram uma redução na magnitude de chuvas extremas em regiões sem cobertura vegetal na área de estudo de acordo com a escala de observação do balanço hídrico. Sendo fundamental para a gestão de riscos em bacias hidrográficas.

Aguiar *et al.*, (2019) realizou um estudo sobre a intensidade do *El Niño* e *La Niña* e a influência na vazão média interanual do rio Amazonas. A análise interanual mostrou que os anos de baixas vazões, possuíam a característica de persistência de ocorrência em relação às altas vazões. A partir de 1989, houve um aumento em relação à amplitude média da vazão de 87.727 m³/s devido a fortes níveis mínimos registrados. Ao analisar a vazão normalizada percebeu-se que na maioria dos anos de baixa vazão foram também anos do fenômeno *El Niño*. Constatado esta persistência de baixas vazões, investigaram-se os fatores de armazenamento e disponibilidade do rio Amazonas.

Segundo Towner *et al.*, (2020), existe outro fenômeno climático originado da interação oceano-atmosfera no Atlântico tropical chamado de Dipolo do Atlântico (DA), também constituído de fases positiva e negativa denominadas de Dipolo do Atlântico positivo (DA+) e Dipolo do Atlântico negativo (DA-). Esse fenômeno ocorre entre aproximadamente 30°N e 30°S e manifesta-se quando há uma diferença de anomalias da temperatura superficial do mar (TSM) entre o Atlântico Tropical Norte (ATN) e o Atlântico Tropical Sul (ATS). As anomalias de TSM positivas no ATN e negativas no ATS indicam a fase positiva do dipolo, enquanto o inverso caracteriza a fase negativa. Essas oscilações de TSM alteram a célula de circulação de Hadley e, principalmente, a circulação de Walker, que afeta a posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). (Lopes, 2020; Soares, 2022; Bier, 2023; Gomes *et al.*, 2024). Towner *et al.*, (2020) ainda ressaltaram que esta configuração térmica favorece o aumento da precipitação na região amazônica devido o fortalecimento da convecção do ar e o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) na direção Sul onde situa-se a Amazônia, uma vez que a convecção do ar é um fator fundamental para formação de nuvens precipitantes, assim como a

ZCIT é considerada o principal sistema atmosférico responsável pela recarga pluvial na Amazônia.

A influência do fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) é outro aspecto importante, pois o ENOS pode modificar os padrões de temperatura e pressão no Oceano Atlântico, reforçando ou atenuando o Dipolo do Atlântico (Jiang; Li, 2021; Chao *et al.*, 2021).

Além disso, o Dipolo do Atlântico está ligado a fenômenos de escala de tempo mais longa, como a Oscilação Decadal do Atlântico (ODA). A ODA modula as condições climáticas do Atlântico tropical ao longo de períodos mais prolongados, e suas fases positivas e negativas podem interagir com o Dipolo do Atlântico, amplificando ou reduzindo suas anomalias de TSM e, conseqüentemente, seus efeitos climáticos regionais (Da Silva Lindemann *et al.*, 2019).

2.1.2 Eventos extremos na Amazônia

As piores secas já registradas na região, foram de 2005, 2010, 2015 e 2023 causaram impactos significativos, atividades como agricultura, pecuária, pesca, transportes, energia, biodiversidade e a saúde da população.

A seca de 2005 foi uma das secas mais intensas e amplamente estudadas, conhecida como a "seca do século". As causas foram atribuídas a um aquecimento anômalo do Oceano Atlântico Norte, que reduziu as chuvas em grande parte da Amazônia Ocidental. A seca de 2005 teve graves conseqüências ambientais e sociais, incluindo incêndios florestais e prejuízos para comunidades ribeirinhas (Shi *et al.*, 2019; De Souza Aguiar, 2019). Em 2010 ocorreu outra seca intensa, com impactos comparáveis aos de 2005. O fenômeno foi associado a confluência de dois fenômenos climáticos, o El Niño e ao aquecimento das águas do Oceano Atlântico, deixando a região da Amazônia muito mais seca. e causou grandes perdas de biodiversidade e aumento na emissão de dióxido de carbono devido à decomposição de matéria orgânica exposta pela seca. A diferença entre os dois episódios – 2005 e 2010 - foi a intensidade. Em 2005, a região atingida foi concentrada no sul da Amazônia entre os rios Madeira e Solimões (De Souza Aguiar *et al.*, 2019; Silva, 2020)

Já a seca de 2010 foi mais intensa na Amazônia Central e no leste da região. O fenômeno causou graves problemas socioambientais, especialmente às populações ribeirinhas, que ficaram isoladas por dependerem dos rios para seu deslocamento (Figura 3).

Figura 4. Seca no rio Solimões com comunidades isoladas.



Fonte: Agência Brasil

Em 2015, o período de seca foi intensificado pelo El Niño, afetando fortemente o Rio Amazonas e seus afluentes. Foi um evento marcante que resultou em níveis baixos de água e comprometeu a logística e o abastecimento de água em várias regiões (Silva, 2020; Ribeiro *et al.*, 2021).

Uma das secas mais graves já registradas ocorreu em 2023, com impactos diretos na navegação e na vida de comunidades ribeirinhas, além de causar uma redução significativa nos níveis dos rios (Figura 4). As águas em frente à cidade de Manaus, capital do Estado do Amazonas, alcançaram apenas 12,70 m, o menor índice desde o começo da série histórica, em 1902, do ponto de vista do nível dos rios, esta foi a seca mais forte já registrada (Silva, 2023; Zogahib *et al.*, 2024). Embora o *El Niño* tenha influenciado nos níveis mais baixos de precipitação, estudos mostram que as mudanças climáticas são o principal

impulsionador da seca por meio de sua influência nas temperaturas mais elevadas, desencadeado pelo prolongamento da estiagem e aumento de incêndios florestais que contribuíram para a poluição do ar devido à disseminação de fumaça (Loureiro *et al.*, 2024; Brandão *et al.*, 2024).

Figura 5. Imagem de satélite comparando rio Amazonas nos anos de 2022 e 2023.



Fonte: Copernicus Sentinel-2

<https://www.copernicus.eu/sk/node/9044>

Por outro lado, os anos de 2009, 2012, 2014 e 2021 se destacaram pelo excesso de chuva e cheias recordes de rios do bioma amazônico. A cheia de 2009 foi uma das maiores já registradas no Rio Amazonas, causou danos a milhares de famílias e afetou áreas agrícolas. Esse evento foi associado ao fenômeno La Niña, que aumenta as chuvas na bacia amazônica (Coutinho *et al.*, 2018; Schöngart *et al.*, 2020). Em 2012, a cheia causou impactos sérios na

infraestrutura e nas comunidades locais. A inundação foi especialmente severa nos rios Solimões e Amazonas (Moreira *et al.*, 2018; Dos Santos Pereira *et al.*, 2018; Abel, 2019).

Em 2014, a cheia histórica de rios do sudoeste da Amazônia, como o Madeira, Mamoré, Guaporé, entre outros, desabrigou milhares de famílias, interditou rodovias, isolou municípios e agravou o risco da ocorrência de doenças, como leptospirose, diarreias, febre tifóide, entre outras (Figura 5). Em Porto Velho, o nível do rio Madeira chegou à marca histórica de 19,74 metros em 30/03/2014, superando em mais de 2 metros o maior nível então registrado no ano de 1997 (17,50 metros). Na cidade, mais de 12 bairros ficaram submersos e no estado quase 30 mil pessoas ficaram desabrigadas ou desalojadas (INPA, 2014; Da Silva Guimarães *et al.*, 2021; Alencar *et al.*, 2021).

Figura 6. Cheia do rio Madeira afetando o tráfego na BR 364.



Fonte: Secom/Acre.

O evento de inundação que atingiu o estado do Amazonas em 2021 superou os níveis de rios atingidos até então em quase 120 anos de monitoramento (Matos *et al.*, 2021; Fleischmann *et al.*, 2023). Climatologicamente, o evento foi associado a uma intensificação de padrões de circulação atmosférica relacionadas ao evento La Niña que atuou na região

desde meados de 2020 até meados de 2021. Além disso, foram observadas condições de aquecimento no Oceano Atlântico aumentando o aporte de vapor de água que chegou à região. O excesso de precipitação causado pela combinação de fatores atmosféricos levou a um aumento expressivo nos níveis dos rios da região (Alves *et al.*, 2023). As cheias do rio Negro são comuns, mas em 2021 bateram a marca recorde de 30,02 metros altura, atingida no dia 01 de junho, a maior desde 1902, quando o dado começou a ser registrado (Figura 6). O rio Solimões, que após encontrar o rio Negro na região de Manaus recebe o nome de Amazonas, também bateu recordes de cheia: 20,8 metros, marca registrada na cidade de Manacapuru (AM), a maior desde o começo da série, iniciada há 49 anos (Dibela, 2021; Sampaio, 2024).

Figura 7. Enchente do rio na cidade de Envira em 2021.



Fonte: Defesa Civil do Amazonas

2.1.3 Influência climática nos rios Amazônicos

Pesquisas de mudanças climáticas têm analisado tendências futuras de variáveis climáticas em toda a extensão da bacia Amazônica, mensurando seus impactos não só nos ecossistemas, como também nas atividades humanas e econômicas (Rocha *et al.*, 2019; De Souza Costa *et al.*, 2020; Serrão, 2022; Lucas, 2022).

Silva (2019) apresentou a proposta de um sistema de previsão de nível mensal do Rio Xingu baseado em Redes Neurais Artificiais *Perceptron* de Múltiplas Camada, uma vez que a cidade de Altamira- PA vem sofrendo com casos extremos de cheias que tendem a provocar inundações, resultando em prejuízos para a sua população. No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dados de precipitação na bacia e sub-bacias do Rio Xingu, e informações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do período de 1979 a 2016. A proposta englobou três cenários de predição: modelo com dados de precipitação, modelo com informações de temperatura da superfície do mar e aplicação utilizando a junção de TSM com precipitação, ainda foram utilizadas algumas métricas para o desempenho de rede, o *Mean Square Error* (MSE) e coeficiente de determinação (R^2). Os resultados satisfatórios obtidos demonstram a grande aplicabilidade das Redes Neurais Artificiais para o problema de previsão de cheias, visto que comparada a outras metodologias possuem maior precisão na busca de soluções para problemas não lineares.

Com o intuito de criar um sistema de alerta hidrológico, Peres (2019) realizou uma análise do processamento de dados de precipitação utilizando Redes Neurais Artificiais. As cinco RNA's que produziram os melhores resultados foram confrontados com os resultados observados. Resultando em um sistema de alerta de seca e cheia no município de Itaituba/PA. Para a apresentação da rede neural, foi implementado um sistema *WEB* com dados diários, mensais e anuais, onde é calculado o nível do rio.

Alguns trabalhos utilizam uma variação das RNN's tradicionais, devido a limitação do uso de dados de séries temporais muito longas. Santos (2021) utilizou uma metodologia para avaliação de Redes Neurais Artificiais (RNA) de memórias de curto-longo prazo (LSTM), para predição de séries temporais de

temperatura e irradiância solar na região amazônica. Os dados utilizados foram obtidos em duas cidades localizadas na região amazônica, sendo dois conjuntos de dados de temperatura e um conjunto de dados de irradiância solar. As arquiteturas utilizadas apresentavam diferenças em seus números de camadas, para analisar a influência de sua complexidade em seus desempenhos.

De Mendonça (2021) utilizou as técnicas de redes neurais artificiais (RNA's) na previsão de variáveis hidrológicas em uma Sub-bacia Hidrográfica do Rio Guamá no Pará. Os modelos hidrológicos chuva-vazão foram baseados em RNA's de arquiteturas MLP (*Multilayer Perceptron*) e NARX (*Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs*). Os resultados mostram a possibilidade da simulação de vazões de pequenas e médias bacias hidrográficas da Amazônia através da combinação de RNAs NARXs, principalmente de bacias com ausência ou limitação de dados.

Com o objetivo de analisar a influência das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na Amazônia Legal e, também, no Arco do Desflorestamento, Costa *et al.*, (2023), utilizou cenários definidos no 5º Relatório do IPCC para projetar precipitações futuras das pequenas bacias. Os resultados demonstraram que nos dois cenários, a vazão mínima de referência tende a diminuir bastante, chegando mesmo a ser nula. E diante dessa redução significativa, os projetos de manejo, uso e captação de água tornam-se imprescindíveis, principalmente, para as populações mais vulneráveis.

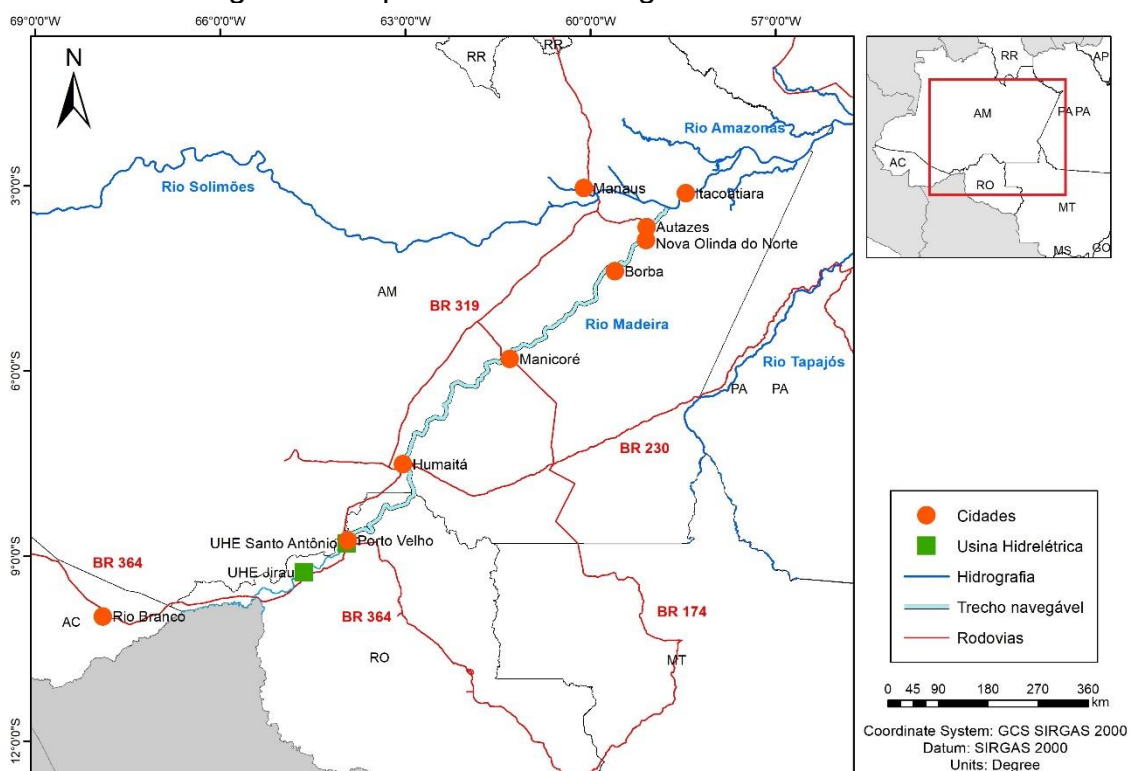
2.2 Transporte de cargas e navegação no rio Madeira

A região Amazônica é conhecida por sua extensa e densa rede de rios e cursos d'água, que, embora variem em extensão e volume, formam uma das mais importantes infraestruturas de transporte fluvial do país. Essa rede fluvial abrange aproximadamente de 20 mil km de vias navegáveis, conforme dados da ANTAQ (2020), e é essencial para a mobilidade na região. Dada a escassez de estradas que conectam a Amazônia a outras partes do país, essa rede de rios desempenha um papel vital na integração econômica e social da região, permitindo o escoamento de produtos agrícolas, minérios e outros recursos naturais que são fundamentais para a economia local e nacional. Além disso, em

muitos locais, o transporte fluvial é a única opção viável, destacando ainda mais sua importância estratégica para a conectividade e o desenvolvimento da Amazônia.

A demanda pela utilização da hidrovia do rio Madeira vem crescendo ao longo dos anos, se tornando um dos principais corredores logísticos do norte do país. Esse processo teve início com a implantação da nova fronteira agrícola de soja e milho na região Centro-Oeste do Brasil, integrando a região aos grandes portos ao longo do rio Amazonas, por onde essas cargas podem ser exportadas (Figura 1). A carga a granel, proveniente das plantações de Mato Grosso e do sul de Rondônia, é transportada pela BR-364, em caminhões até Porto Velho, onde os comboios graneleiros são carregados seguindo viagem para o terminal de Itacoatiara/AM ou Santarém/PA (CNA, 2022).

Figura 8. Mapa do trecho navegável do rio Madeira.



Fonte: Adaptado TCU (2017).

Em 2023, a movimentação de cargas na hidrovia representou 10,7 milhões de toneladas (ANTAQ, 2024). As principais cargas movimentadas pelo rio Madeira são soja, milho, fertilizantes, combustíveis e outros grãos líquidos

e gasosos, alimentos perecíveis e não perecíveis, contêineres, automóveis, cargas gerais e cargas rolantes denominadas RoRo caboclo (ANTAQ, 2023). O meio mais comum de transporte utilizado são os comboios (Figura 8), que são um conjunto de barcaças ou chatas não propulsionadas e acopladas, movimentadas por uma embarcação propulsada, conhecida pelo termo empurrador ou rebocador (Figura 9). Os empurradores operam acopladas às barcaças que não tem propulsão própria, mas não transportam cargas em seu casco. A recomendação para as embarcações na época da cheia do rio é de calado máximo de 6,8 metros e na seca do rio calado mínimo 1,7 metros durante a extensão do trecho navegável de Porto Velho a Foz do Rio Amazonas (PDZ, 2022).

Figura 9. Barcaça utilizada no transporte de grãos no rio Madeira.



Fonte: Secom - Governo de Rondônia

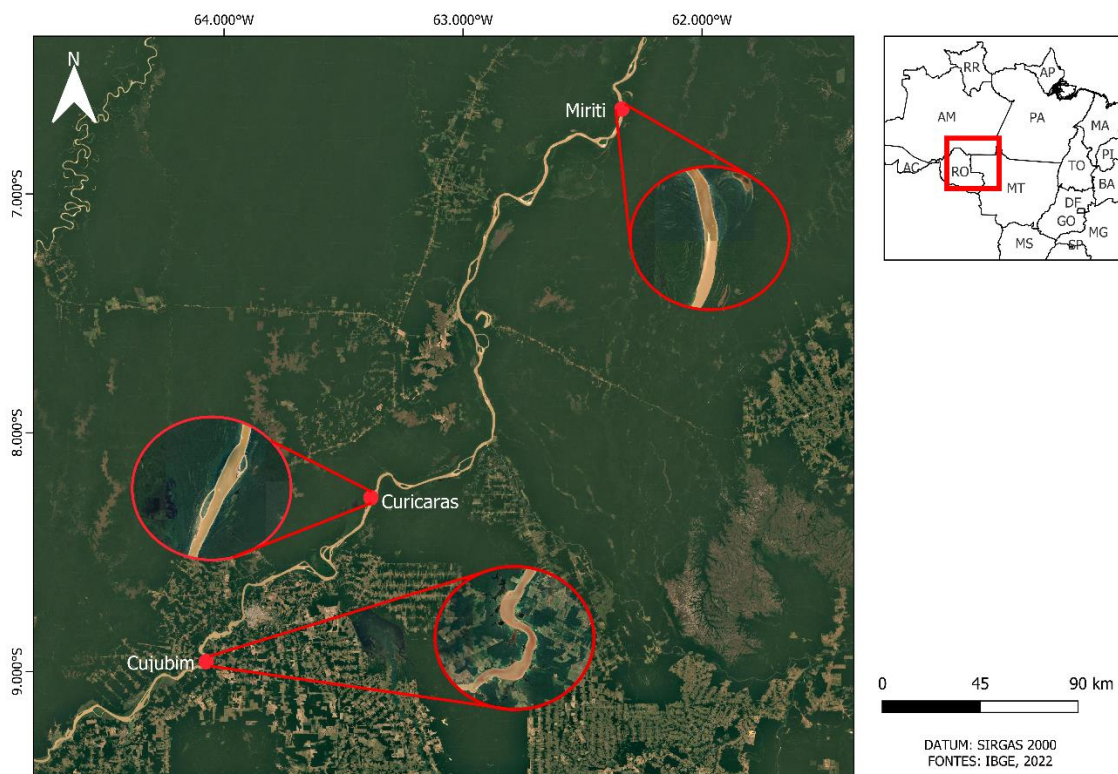
Figura 10. Empurrador e comboio de barcaças.



Fonte: Secom - Governo de Rondônia

Para uma navegação mais segura são tomadas medidas como a dragagem, sinalização e monitoramento para manter um canal adequado ao transporte hidroviário de alta capacidade que exige grandes embarcações. Segundo a ANTAQ (2023), foram mapeados 75 (setenta e cinco) pontos críticos para a navegação, entre bancos de areia e pedrais. Na maior parte do rio, existem profundidades naturais que permitem a navegação. Os pontos críticos são trechos do rio nos quais o acúmulo de sedimentos depositados no fundo gera obstruções às embarcações. É importante destacar que a dinâmica do rio altera o leito do rio a cada ano, e o traçado do canal de navegação deve adequar-se a essas modificações. Dentre os pontos mais recorrentes para intervenção por meio de dragagem destacam-se Curicacas, Miriti e Cojubim (PADMA 2022; PMH, 2022). O mapa a seguir (figura 11) ilustra os pontos críticos citados.

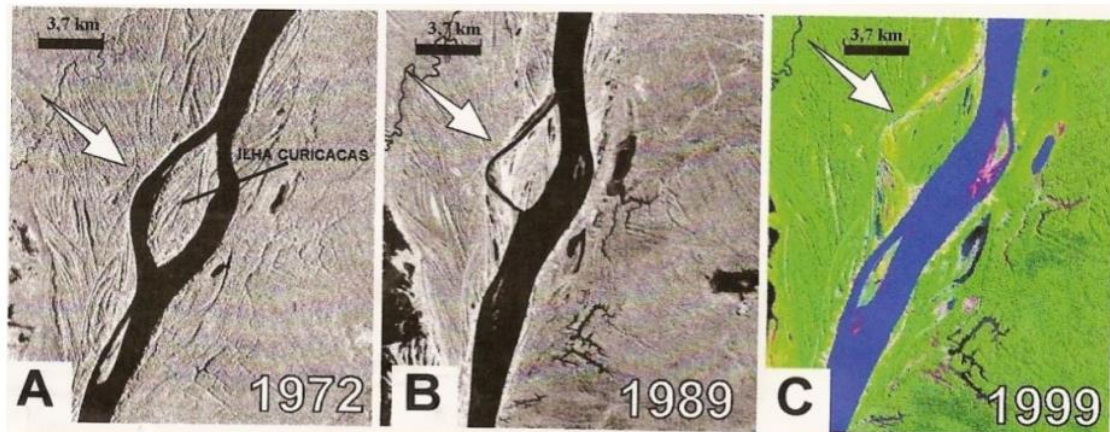
Figura 11. Principais pontos críticos para a navegação na hidrovia do rio Madeira.



Fonte: Autora (2024).

Adamy (2016) compilou imagens de satélite do ponto crítico Curicacas para ilustrar a dimensão dessas modificações do leito ao longo dos anos, que alteraram morfologia da Ilha das Curicacas e das margens ao redor desse trecho em um período de 27 anos.

Figura 12. Morfologia fluvial temporal da Ilha Curicacas.



Fonte: Adamy (2016)

Durante os períodos de estiagem, as rodovias BR-319 e BR-230 desempenham um papel de vias alternativas para o transporte de cargas, no entanto, também enfrentam limitações impostas pela sazonalidade e pela infraestrutura.

A BR-319 liga Porto Velho-RO a Manaus-AM, passando por Humaitá-AM. O PDZ (2022), registra que a conclusão da obra da construção da Ponte Rondon-Roosevelt, sobre o Rio Madeira, acarretou um trânsito intenso com destino a Humaitá que antes era realizado por balsas.

Os primeiros 200 km da rodovia, a partir de Porto Velho, possui asfalto em boas condições, até chegar a Humaitá (AM). No entanto, o cenário muda completamente, a partir do chamado “trecho do meio”, (do km 250 ao km 656), que corta uma das áreas mais conservadas da região amazônica. A reconstrução e asfaltamento do trecho do meio da BR 319 é um projeto que, atualmente, apresenta muitos entraves socioambientais (Castro de Jesus *et al.*, 2023; Borges, 2024).

A BR-230, também conhecida como Rodovia Transamazônica, é uma das principais rodovias federais do Brasil. Com mais de 4 mil quilômetros, a estrada liga as regiões Norte e Nordeste. No Amazonas, a BR-230 passa pelas cidades de Maués, Apuí, Novo Aripuanã, Manicoré, Humaitá, Canutama e Lábrea. Apesar da extensão mais da metade da rodovia não é pavimentada, e em alguns

trechos, torna-se intransitável durante as épocas de chuva devido à lama e aos alagamentos (Silva *et al.*, 2019).

Esses cenários comprometem a logística, elevando custos e a eficiência do transporte. Os custos do transporte hidroviário incluem custos diretos de manutenção dos navios, serviços e operações. Os períodos em que a navegação é paralisada ou limitada, o tempo perdido devido a danos ou acidentes ou ainda tempos prolongados por operações como desmembramento de comboios ou tempo de espera para passagem de um comboio em regiões onde o canal é estreitado, ou mesmo a redução da capacidade de transporte por conta das baixas profundidades (PDZ, 2022; ANTAQ, 2023).

2.3 Previsão Hidrológica

Os modelos de previsão hidrológica têm se mostrado valiosos para lidar com a complexidade das interações entre os sistemas hidrológicos e climáticos (Tucci, 2005; Da Silva *et al.*, 2016; De Souza *et al.*, 2019). A partir desses modelos é possível construir cenários futuros com base em dados históricos e condições ambientais. Esses dados são usados para construir modelos matemáticos e computacionais que podem simular o comportamento do ciclo hidrológico em uma área específica (Camargo, 2019; De Souza Costa, 2021; Blanco *et al.*, 2023; Costa *et al.*, 2023).

As escalas temporais e espaciais em que são aplicadas as previsões interferem diretamente nas aplicações e funcionalidades de um sistema de previsão. Neste contexto, quanto à escala temporal, as previsões podem ser de curto prazo, em tempo real, ou previsões de longo prazo, sazonais. Independentemente da escala temporal os sistemas de previsão necessitam como entrada dados observados, que serão então processados pelo modelo para simular adequadamente os processos hidrológicos da área. Tal modelo deve então ser calibrado para representação das características específicas da região estudada (Gama, 2019).

Segundo (Almeida; Serra, 2017) os modelos podem ser classificados como:

- **Modelos Determinísticos e Estocásticos:** Os modelos determinísticos são baseados em relações determinísticas entre entradas e saídas do sistema hidrológico, onde cada variável é determinada por equações matemáticas e os parâmetros do sistema não sofrem variações aleatórias. Por outro lado, os modelos estocásticos lidam com a incerteza e a variabilidade inerentes aos processos hidrológicos. Eles incorporam a aleatoriedade nas entradas do modelo, são utilizados principalmente em previsões de longo prazo.
- **Modelos Conceituais ou Empíricos:** Modelos conceituais são baseados na compreensão teórica dos processos hidrológicos, usando equações físicas para descrever o comportamento do sistema. Já os modelos empíricos são desenvolvidos a partir de observações e dados empíricos sem necessariamente entender completamente os mecanismos subjacentes. Eles são construídos a partir de relações estatísticas entre variáveis observadas, sem considerar necessariamente os princípios físicos subjacentes.
- **Modelos Discretos ou Contínuos:** Os modelos discretos e contínuos diferem principalmente na forma como representam o tempo e o espaço. Os modelos discretos dividem o tempo em intervalos definidos e o espaço em unidades discretas. Eles são frequentemente usados em bacias hidrográficas menores ou em escalas temporais específicas, como horas ou dias. Enquanto os modelos contínuos operam em uma escala de tempo e espaço contínuos, usando equações diferenciais para descrever os processos hidrológicos ao longo do tempo e em uma área contínua. Sendo empregados em bacias hidrográficas maiores ou em escalas temporais mais amplas, como meses ou anos. Esses modelos são úteis para previsões de longo prazo, análises regionais e estudos de mudanças climáticas.

- **Modelos Distribuídos e Concentrados:** Modelos concentrados representam o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica como um único reservatório ou um conjunto de reservatórios conectados. Eles simplificam a complexidade do sistema hidrológico ao agrupar todas as entradas, saídas e processos dentro da bacia em um único ponto de observação. Em contrapartida, os modelos distribuídos representam o sistema hidrológico considerando a heterogeneidade espacial e a distribuição espacial das características da bacia, como topografia, uso do solo, cobertura vegetal e solos. Eles dividem a bacia em sub-bacias ou células de grade e modelam os processos hidrológicos em cada unidade espacialmente distinta.
- **Modelos estacionários e dinâmicos:** Enquanto os modelos estacionários assumem que as condições e os parâmetros do sistema hidrológico permanecem constantes ao longo do tempo, e são aplicáveis em situações onde as características do sistema, como padrões climáticos e uso do solo, não mudam significativamente ao longo do período de estudo, os modelos dinâmicos incorporam a variação temporal das condições do sistema hidrológico, permitindo que as características do sistema evoluam ao longo do tempo.

As RNA's vem sendo usadas a alguns anos para modelar padrões climáticos complexos e não lineares a partir de dados observados (Yang, 2019; De Mendonça, 2021; Soares, 2022; Silva, 2024). Isso inclui prever temperaturas, padrões de chuva, níveis do mar e eventos climáticos extremos. As redes neurais podem aprender a partir de séries temporais climáticas e identificar relações complexas, ajudando a melhorar a compreensão dos processos climáticos. Essas previsões podem ser usadas para tomar medidas de adaptação e para avaliar os potenciais impactos das mudanças climáticas em diferentes regiões.

2.4 Redes Neurais

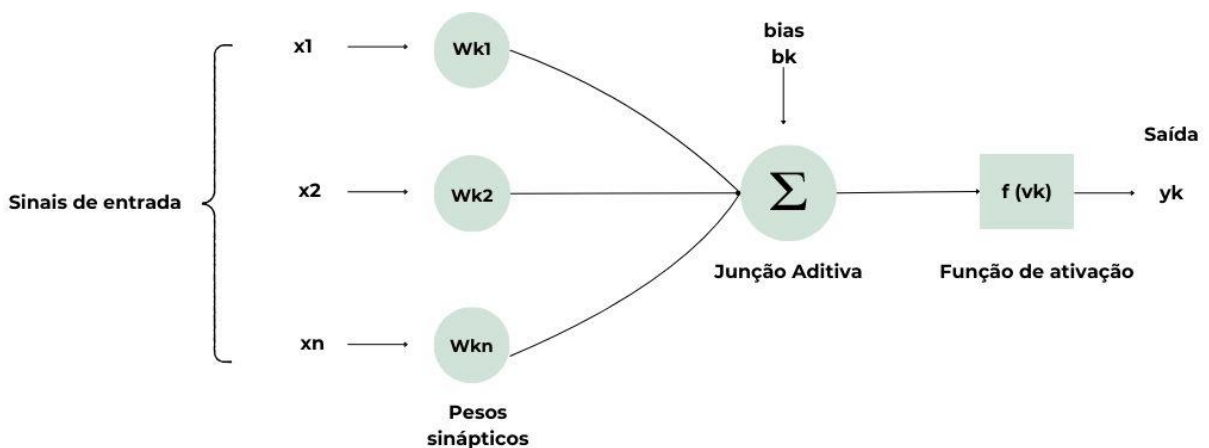
2.4.1 Funcionamento de uma rede neural artificial

A concepção de redes neurais artificiais foi influenciada pela compreensão do funcionamento do cérebro humano. Em 1943, o neurofisiologista Warren McCulloch e o lógico Walter Pitts publicaram um artigo seminal intitulado "*A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*". Nesse trabalho, foi introduzida uma abordagem matemática para modelar neurônios biológicos como unidades de processamento que realizam operações lógicas (Haykin, 2001).

Esses estudos foram fundamentais para o desenvolvimento do modelo *Perceptron*, cujo algoritmo de aprendizado permite realizar o ajuste de pesos de cada valor de entrada de acordo com os erros cometidos durante a classificação de amostras no processo de treinamento. Dessa maneira, o *Perceptron* consegue aprender a reconhecer padrões. Esse modelo, proposto por Rosenblatt (1958) é a base para a construção de diversos modelos de IA guiados por dados, e é utilizado dentro das RNA's (Vendruscolo, 2017; Aggarwal, 2018).

As redes neurais artificiais são modelos computacionais que buscam simular o funcionamento dos neurônios do cérebro humano para realizar tarefas complexas de processamento de informações (Aggarwal, 2018). Elas são compostas por camadas de neurônios artificiais interconectados, onde cada um dos quais realiza operações simples, mas quando organizados em uma rede, podem realizar tarefas mais complexas, como reconhecimento de padrões, classificações e previsões. Um neurônio artificial (Figura 2) é composto funcionalmente por três elementos (Haykin, 2001): um conjunto de sinapses ou links de comunicação, cada uma dessas apresentando um determinado peso; um somador para realizar o somatório dos sinais de entrada, ponderado pelas sinapses (pesos sinápticos) do neurônio e uma função de ativação, para filtrar a dimensão da saída do neurônio.

Figura 13. Estrutura de um neurônio artificial



Fonte: Autora (2024).

A Figura 2 é uma ilustração da estrutura de um neurônio artificial, os sinais de entrada (x_n), ponderados com pesos (w_{kn}); uma soma é obtida por adição das entradas multiplicado por seus respectivos pesos e adicionando um sinal preconizado (b_k). O resultado dessa soma (v_k) atua através de uma função de ativação [$f(v_k)$] e fornece a saída do neurônio (y_k).

Matematicamente um modelo simplificado de neurônio artificial pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$y_k = f(y_k)$$

em que: y_k = saída do neurônio artificial; f = função de ativação.

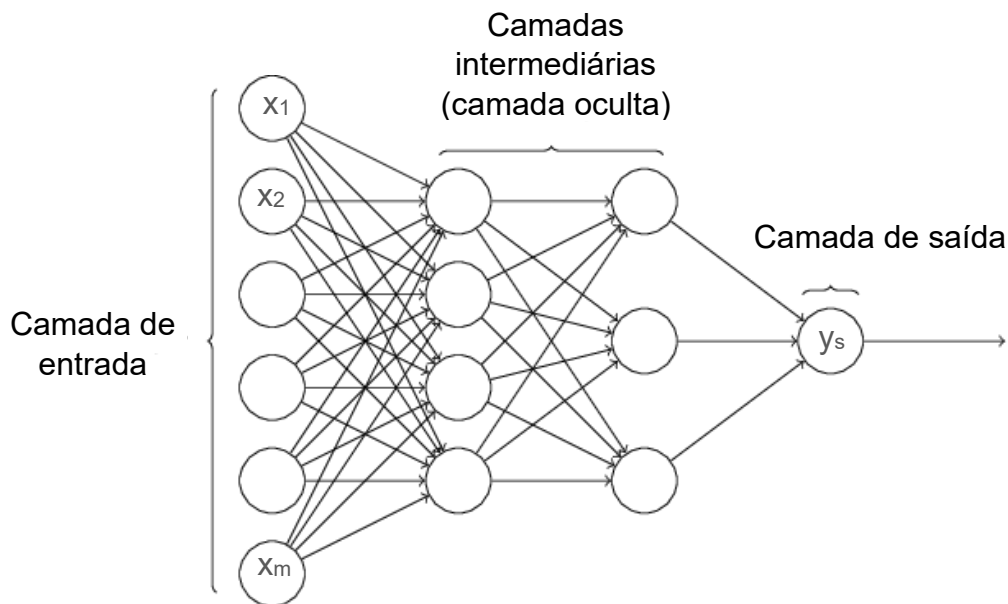
Além da estrutura básica, existem arquiteturas de redes neurais especializadas. As arquiteturas se referem às diferentes maneiras pelas quais os neurônios artificiais são organizados e conectados dentro de uma rede neural para realizar tarefas de aprendizado. Cada arquitetura é projetada para resolver tipos específicos de problemas, e sua estrutura influencia diretamente a capacidade da rede de processar dados, identificar padrões e fazer previsões. A escolha da arquitetura ideal depende da natureza do problema e dos dados.

2.4.3 Redes *perceptrons* de múltiplas camadas (MLP).

As redes MLP, ou *Multilayer Perceptron*, surgiram como uma forma de superar a limitação da rede com uma única camada de não solucionar problemas que não fossem linearmente separáveis. Em 1986, Rumelhart, Hintont e Willians (1986) demonstraram que era possível treinar com eficiência redes com camadas intermediárias, treinadas com o algoritmo *backpropagation*, resultando nas redes MLP. Durante o treinamento da RNA há o ajuste dos pesos, cujo objetivo é reduzir os erros na saída da rede. Dessa forma, deve-se dispor da amostra das respectivas saídas desejadas para que os pesos e limiares sejam ajustados de forma contínua pelo algoritmo de aprendizado, caracterizando, assim, um treinamento supervisionado. Segundo Haykin (2001), o treinamento da rede é finalizado quando é atingido um índice de desempenho estabelecido satisfatório, ou quando o número pré-definido de iterações é finalizado, sendo que o número de neurônios em cada camada, assim como a quantidade de camadas intermediárias podem influenciar na resposta do sistema e no esforço computacional, tanto no treinamento quanto na execução da rede (Silva *et al.*, 2016).

A Figura 3, adaptada de Haykin (2001), ilustra a rede neural MLP com parâmetros de entrada $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]$, camadas intermediárias, e uma camada de saída fornecendo parâmetros y_s .

Figura 14. Rede Perceptron Multicamadas



Fonte: Adaptado Haykin (2001)

A aprendizagem de redes MLP por retropropagação (algoritmo *backpropagation*) consiste de duas etapas: a propagação e a retropropagação. Na etapa de propagação, um padrão de ativação é aplicado aos nós da camada de entrada da rede e seu efeito se propaga através da rede, camada por camada. Na última camada, um conjunto de saídas é produzido, configurando-se como resposta real da rede. Na etapa de retropropagação, todos os pesos sinápticos são ajustados de acordo com uma regra de correção de erro. O sinal de erro é propagado para trás através da rede, contra a direção das conexões sinápticas, sendo os pesos sinápticos ajustados para fazer com que a resposta real da rede se aproxime da resposta desejada, no sentido estatístico (Fleck, 2016).

2.4.2 Funções de Ativação

As funções de ativação são responsáveis por introduzir não-linearidade aos modelos, permitindo que as redes aprendam padrões complexos. Determinando como as saídas de um neurônio são transformadas antes de serem passadas para a próxima camada. As funções de ativação mais comumente utilizadas são: sigmoide, tangente hiperbólica (tanh) e ReLU (Rectified Linear Unit).

a) Função ReLU (Rectified Linear Unit)

A ReLU (3) é uma das funções de ativação mais populares em redes neurais modernas devido à sua simplicidade e eficiência. Ao contrário da sigmoide e da tangente hiperbólica, a ReLU é linear para entradas positivas e retorna zero para entradas negativas, o que resolve o problema do desaparecimento do gradiente.

$$f(z) = \max(0, z) \quad (3)$$

A principal vantagem de usar a função ReLU sobre outras funções de ativação é que ela não ativa todos os neurônios ao mesmo tempo. Isso significa que, ao mesmo tempo, apenas alguns neurônios são ativados, tornando a rede esparsa e eficiente e fácil para a computação.

2.4.4 Treinamento e aprendizagem das RNA's

O aprendizado de uma RNA é realizado por meio de processos iterativos de ajustes aplicados aos pesos sinápticos, o chamado treinamento. O aprendizado só ocorre quando a rede neural atinge uma solução generalizada para um determinado problema. Em síntese, treinar uma rede é ajustar a sua matriz de pesos sinápticos de forma que o vetor de saída coincida com um valor desejado para cada vetor de entrada (Aggarwal, 2018). Na fase de aprendizagem a RNA extrai informações relevantes de padrões de informação

apresentados a ela, dando origem a uma representação própria do problema. Nesta etapa, os parâmetros da rede são ajustados, os quais são caracterizados pelos pesos das conexões entre as unidades de processamento. Ao final da etapa de treinamento, a rede terá adquirido conhecimento sobre o ambiente em que está operando, sendo este, “armazenado” em seus parâmetros (Fleck, 2016).

Segundo Silva (2016) normalmente o conjunto de amostras disponíveis é subdividido em dois grupos, o subconjunto treinamento, contendo de 60 a 90% das amostras totais, que é utilizado para o processo de treinamento e o subconjunto teste, contendo de 10 a 40% das amostras restantes, utilizado para verificar se a generalização das soluções do modelo está em patamares aceitáveis.

O critério para interrupção dos ciclos de treinamento, é a obtenção de um erro considerado tolerável, para tanto necessitamos utilizar indicadores como erros (erro máximo, erro médio, erro padrão etc.) ou estatísticas de desempenho (erro quadrático, erro absoluto médio, coeficiente de Nash-Sutcliffe). Também se faz necessário um critério de parada em casos de não convergência dos indicadores, que pode ser um número máximo de ciclos (épocas).

Diversos métodos de treinamento podem ser empregados para instruir redes neurais artificiais (Haykin, 2001), variando na forma como os pesos são ajustados. Esses métodos podem ser agrupados em dois principais: o Aprendizado Não-Supervisionado e o Aprendizado Supervisionado. No Aprendizado Não-Supervisionado, a rede recebe apenas os dados de entrada e os organiza em diferentes categorias com base em suas características semelhantes, ajustando os pesos da rede de acordo. Por outro lado, no Aprendizado Supervisionado, há um guia externo que fornece tanto os dados de entrada quanto os resultados desejados para a rede. Esse tipo de aprendizado pode ser subdividido em Treinamento Dinâmico e Treinamento Estático (Fiorin *et al.*, 2011).

2.5 Avaliação de desempenho

As avaliações de desempenho são aplicadas nas diferentes etapas de elaboração de um modelo baseado em RNA's, seja na avaliação da eficiência do processo de aprendizagem (treinamento) ou do processo de teste (verificação). Onde, no último, a eficiência é calculada através da comparação dos resultados obtidos pelo modelo às situações reais não contempladas durante o processo de treinamento. Para isso algumas métricas de avaliação podem ser utilizadas, entre elas destaca-se a aplicação do Erro Quadrático Médio (RMSE), MAE (Erro Médio Absoluto) e R² (Coeficiente de determinação) (Ruezzene *et al.*, 2021).

2.5.1 Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE (4) é uma medida da dispersão ou variação dos erros entre as previsões feitas pelo modelo e os valores reais dos dados. A principal diferença entre o RMSE e o EQM é que o RMSE envolve a raiz quadrada do EQM, o que resulta em uma métrica expressa nas mesmas unidades que os dados originais, tornando-a mais intuitiva e facilmente interpretável.

A fórmula do RMSE é a seguinte:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_l^n (Q_e - Q)^2}{n}} \quad (4)$$

2.5.2 MAE – Erro Médio Absoluto

Assim como o RMSE e o EQM, o MAE mede a diferença entre as previsões feitas pelo modelo e os valores reais dos dados, mas com uma abordagem ligeiramente diferente. Enquanto o EQM e o RMSE envolvem o quadrado das diferenças entre as previsões e os valores reais, o MAE simplesmente calcula a média das diferenças absolutas entre as previsões e os valores reais. A fórmula do MAE é a seguinte:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

O MAE é uma métrica mais robusta em relação a valores extremos (outliers) nos dados, porque não envolve o quadrado dos erros. Isso significa que um único valor extremo tem um impacto mais limitado no MAE do que teria no RMSE ou no EQM. Além disso, como as diferenças absolutas são usadas, o MAE é expresso nas mesmas unidades dos dados originais, o que o torna facilmente interpretável.

2.5.3 R² – Coeficiente de determinação

O R² quantifica a proporção da variabilidade total nos dados de resposta (variável dependente) que é explicada pelo modelo. Em essência, o R² fornece uma medida da proximidade das previsões do modelo com os valores reais, sendo que um valor mais próximo de 1 indica que o modelo se ajusta bem aos dados, enquanto um valor próximo de 0 indica que o modelo não está explicando muita variabilidade.

A fórmula do R² é a seguinte:

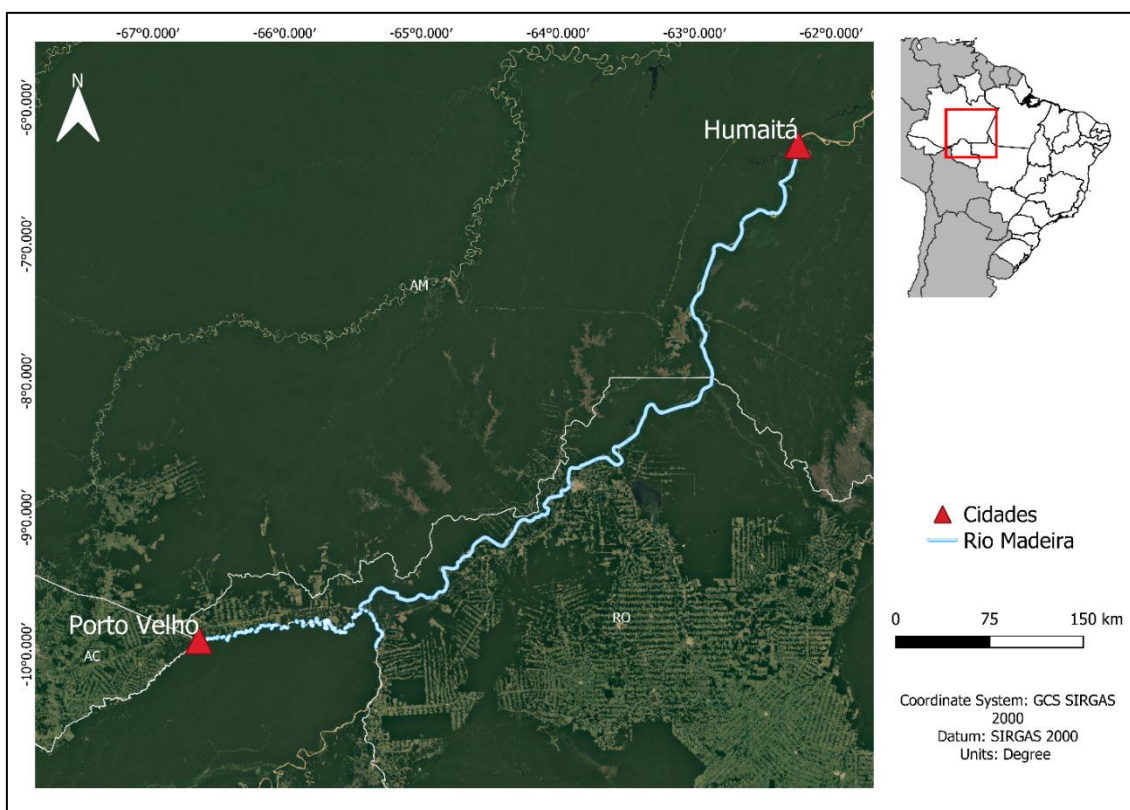
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})} \text{ com } \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i y_i$$

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Caracterização da área de estudo

O rio Madeira é um dos principais afluentes da margem direita da hidrovia do rio Amazonas, representando a segunda hidrovia mais importante da região norte (ANTAQ, 2024). Segundo o DNIT (2021) a hidrovia do rio Madeira apresenta uma extensão navegável de 1.060 km, entre Porto Velho e a foz, localizada no município de Itacoatiara (AM). Essa extensão está distribuída em aproximadamente 180 km dentro dos limites do estado de Rondônia e 876 km no estado do Amazonas (Figura 15).

Figura 15. Area de Estudo



Fonte: Autora (2024)

O rio é navegável durante todo o ano, permitindo o tráfego de comboios de barcaças de carga com de 40 mil toneladas (PDZ, 2022). O ciclo sazonal das águas é caracterizado por períodos de estiagem, ou de águas baixas, de julho a outubro, e o período de cheias ou de águas altas, que vai de fevereiro a maio

(Lopes, 2018). Durante o período de cheias, o rio Madeira sofre influência do rio Amazonas, ocasionando em grandes áreas de inundação e elevadas profundidades, alagando os afloramentos rochosos e ilhas que afloram na estiagem nos trechos mais a jusante do rio.

A lâmina d'água esperada nos meses de águas baixas é de 1,7 metros. O regime das águas do rio é composto de 2 períodos distintos e existe o fenômeno do “repiquete”, geralmente nos meses de outubro e novembro, quando ocorre uma variação de nível de aproximadamente 3 metros. A amplitude de variação de nível entre a estação das cheias e das águas rasas é de 15 metros, e a largura do rio é de normalmente 1km (ANTAQ, 2023).

Devido a dinâmica hidrológica do rio a capacidade de carregamento das embarcações é afetada. Esse processo pode resultar em reduções gerais da tonelagem de mais de 70% em comparação com as operações normais (Creech *et al.*, 2021).

O clima da Amazônia é afetado principalmente por mudanças sazonais da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é o principal sistema produtor de chuvas na estação chuvosa (Sori, 2018). A precipitação média na bacia é da ordem de 1834 mm ano⁻¹ (Vergasta *et al.*, 2020). O Rio Madeira é classificado como um rio de águas brancas tais como os rios Solimões, Purus e Juruá, entre outros, por transportar grande quantidade de material em suspensão durante a estação chuvosa, quando sua vazão cresce exponencialmente, chegando a 45.000-50.000 m³/s (período chuvoso). Nos períodos secos, a vazão observada está entre 5.000-6.000 m³/s (período seco), mas a média anual de é de 23.000 m³/s. Isso faz com que o rio tenha um comportamento tipicamente sazonal e variável conforme a estação climática predominante (ANTAQ, 2023). A velocidade de fluxo das águas do Rio Madeira desempenha um papel importante no processo de erosão e modelado fluvial, estando vinculada diretamente a vazão (Peixoto *et al.*, 2024; Laureanti *et al.*, 2024).

Os rios com essa classificação, água branca, são muito instáveis, com remodelamentos constantes do leito submetido a uma dinâmica fluvial intensa, principalmente nos cursos médio e inferior, modificando de forma permanente seu curso, possuindo ao mesmo tempo uma ampla planície de inundação, onde

os processos fluviais são mais atuantes, seja pela erosão ou pela deposição de sedimentos dentro do canal, como também pelos efeitos dos transbordamentos periódicos (Villamizar *et al.*, 2020).

3.2 Aquisição de dados

3.2.1 Variáveis Hidroclimáticas

O conjunto de dados de temperatura e umidade foram obtidas do Banco de Dados Meteorológicos do INMET, enquanto a variável de cota (nível) do Banco de Dados Hidrometeorológicos da Agência Nacional de Águas (ANA). Para a análise do comportamento dessas variáveis foram utilizados dados no período de 1993 a 2024, a consistência dos dados das estações utilizadas foi o fator determinante na escolha.

Devido à ausência e falhas nas séries temporais nos dados de precipitação da ANA (média de 30 anos), foram utilizados os dados de produto de clima derivados de sensoriamento remoto como o Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS). Os dados do produto CHIRPS já foram validados por diversos estudos na região amazônica (Paca *et al.*, 2020; Cavalcante *et al.*, 2020; Sapucci *et al.*, 2022; Dos Santos Silva *et al.*, 2023;). Além disso, Cordeiro e Blanco (2021) constataram que o produto CHIRPS apresenta as melhores estimativas de dados mensais de precipitação quando comparado a outros produtos de satélites na região amazônica, sendo adequado para a estimativa de precipitação na região.

Para as análises das projeções climáticas futuras foram obtidos os dados do projeto *Coupled Model Intercomparison Program Versão 6 - CMIP6* (Wu *et al.*, 2021). Os dados fornecidos são no formato netcdf. Para esta pesquisa foram selecionadas as variáveis de temperatura, umidade e precipitação para as estações analisadas (escala 100x100 km), com os intervalos de tempo entre 2025-2030 e dois cenários de emissões de gases do efeito estufa, SSP5-8.5 e SSP5-2.6. O MIROC6 foi o modelo climático global utilizado (SHIOGAMA, 2019), desenvolvido pela *Atmosphere and Ocean Research Institute (University of Tokyo)*, *National Institute for Environmental Studies* e *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (MIROC6) do Japão, apresenta uma

resolução de grade de $1,28^\circ \times 2,56^\circ$ de latitude por longitude. O modelo MIROC6 apresenta dados mais precisos dos sistemas climáticos tropicais e a circulação atmosférica de latitudes médias graças às novas parametrizações inovadoras para processos convectivos e inclusão da estratosfera (Tatebe *et al.*, 2019). Da mesma forma, para estudos que avaliaram os modelos do CMIP6 sinalizam a representação mais exata deste modelo em comparação com os demais estudados (Rivera e Arnould, 2020; Shiogama *et al.*, 2023).

Para a personalização e processamento das informações climáticas foi importante considerar os seguintes critérios: escala espacial, escala temporal, horizonte temporal, modelo climático, coordenadas da área de estudo e cenários de emissões. A Tabela 2 traz um exemplo aplicado a área de estudo.

Tabela 2. Informações utilizadas para definir os critérios das projeções climáticas para a área de estudo.

Critério	Dados						
Escala espacial	Local/Coordenadas: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Lat</th> <th>Log</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-7,50</td> <td>-63,02 (Humaitá)</td> </tr> <tr> <td>-8,75</td> <td>-63,92 (Porto Velho)</td> </tr> </tbody> </table>	Lat	Log	-7,50	-63,02 (Humaitá)	-8,75	-63,92 (Porto Velho)
Lat	Log						
-7,50	-63,02 (Humaitá)						
-8,75	-63,92 (Porto Velho)						
Escala temporal	Mensal						
Horizonte temporal	2025-2030 (Projeções)						
Modelo climático	MIROC6						
Cenários de emissões	SSP1-2.6: Emissões são reduzidas de forma lenta, chegando a zero por volta de 2075. SSP5-8.5: Desenvolvimento baseado no uso de combustíveis fósseis.						

Fonte: Autora (2024)

3.2.3 Embarcação-tipo, base cartográfica e nível d'água

Inicialmente, desenvolve-se uma série de estudos com relação à carga transportada, a demanda de transporte, as embarcações já utilizadas na hidrovia, e a partir destes estudos define-se a embarcação-tipo (Figura 15).

Na hidrovia do rio Madeira, o comboio tipo Mississippi é a principal embarcação em operação de transporte de cargas. As formações de comboios predominantes de granéis sólidos são de 20 barcaças, largura de 42,68m e comprimento de 305m, formação de 5 linhas e 4 colunas, com empurradores na formação. Para a composição dos comboios, utilizou-se a situação atual operada no Porto Organizado dentro do Poligonal Portuário, ou seja, as formações de comboios podem ser superiores as elencadas, salvo as limitações previstas de comboios regulados pela Marinha do Brasil (PDZ, 2022).

Figura 16. Embarcação-tipo do rio Madeira



Fonte: Autora (2024)

Tabela 3. Características do comboio.

Tipo de embarcação	Características	
	Comboio – Empurrador e chatas	Comprimento
Boca		42,68m
Calado		3,66 m
Capacidade de carga		40t

Fonte: Autora (2024)

Para analisar as profundidades da área de estudo foram obtidas as cartas náuticas, disponibilizadas pela Marinha do Brasil, que foram posteriormente digitalizadas.

Nas cartas náuticas obtém-se os dados de profundidade e estes foram vetorizadas utilizando o software *AutoCAD Civil 3D*. As profundidades estão associadas ao nível de redução calculado para as cotas de níveis d'água da estação fluviométrica a carta está referenciada. Como as cartas não são referenciadas a nenhum datum, é necessário determinar a altimetria do nível de redução (NR) utilizando a referência de nível (RN) obtida na ficha descritiva F-43 fornecida pela Marinha do Brasil.

O nível de redução é o plano de referência ao qual todas as profundidades cartografadas estão relacionadas. É definido, segundo a Organização Hidrográfica Internacional, como "um plano tão baixo que a maré, em condições normais, não fique abaixo dele" (CHM, 2021). Sendo assim, quando apresentado um nível de redução (NR) de 90% significa o nível no qual em 90% do tempo de um ciclo hidrológico a hidrovia permanece com no máximo esse valor. Como o NR (nível de redução) adotado pela DHN é normalmente o nível médio das baixa-mares de sizígia (MLWS), geralmente se encontram maiores profundidades que as sondagens apresentadas na carta. No entanto, devido as BM de sizígia, podem ser encontradas profundidades menores que as constantes da carta.

3.3 Processamento de dados

As redes neurais artificiais foram desenvolvidas no *software* Python® na biblioteca *TensorFlow*. Para o treinamento das redes neurais artificiais com as diferentes combinações de dados, utilizou-se a arquitetura *multilayer perceptron* com o algoritmo *feedforward backpropagation* amplamente citado na literatura devido aos ótimos resultados na previsão de séries temporais.

Neste estudo, todos os dados foram divididos em treinamento (90% dos dados) e teste (10%) para modelos de aprendizado.

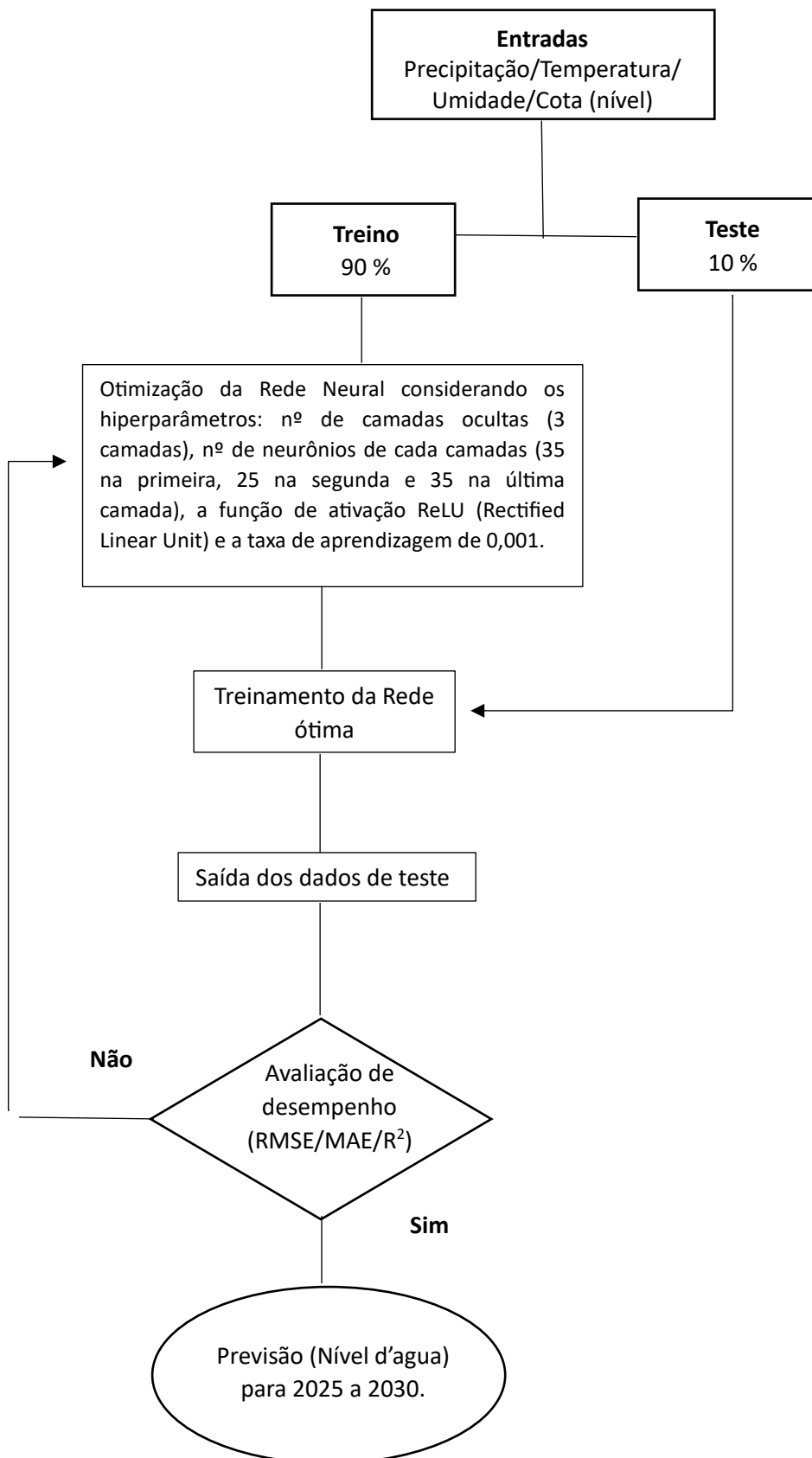
Foram realizados 2 cenários de testes, o cenário SSP1-2.6 apresenta emissões reduzidas de gases do efeito estufa (GEE), enquanto que o cenário

SSP5-8.5 exibe emissões mais intensas. As entradas das RNA's são constituídas por dados de precipitação, temperatura, umidade e cota (nível d'água) do trecho de Porto velho a Humaitá. Já a saída da rede é composta pela previsão de cota da estação de Humaitá para o período de 2015 a 2030. No entanto, somente os dados futuros do período de 2025 a 2030 foram ilustrados nos resultados dos mapas de profundidade.

A partir dos dados previstos pela rede neural para os anos de 2025 a 2030, para os cenários SSP1 2.6 e SSP 5 8.5, foram criados mapas de superfície das profundidades no canal de navegação. Esses resultados foram gerados a partir dos menores níveis d'água, que representam os períodos mais críticos para o transporte na hidrovia.

Foi realizado um processo de otimização dos hiperparâmetros da rede para determinar a melhor rede, nos dois cenários considerados, que se ajuste a esses dados: nº de camadas ocultas (3 camadas), nº de neurônios de cada camadas (35 na primeira, 25 na segunda e 35 na última camada), a função de ativação ReLU (Rectified Linear Unit) e a taxa de aprendizagem de 0,001. O fluxograma da figura 17 apresenta um resumo da metodologia desenvolvida nesta pesquisa.

Figura 17. Fluxograma da metodologia aplicada



Fonte: Autora.

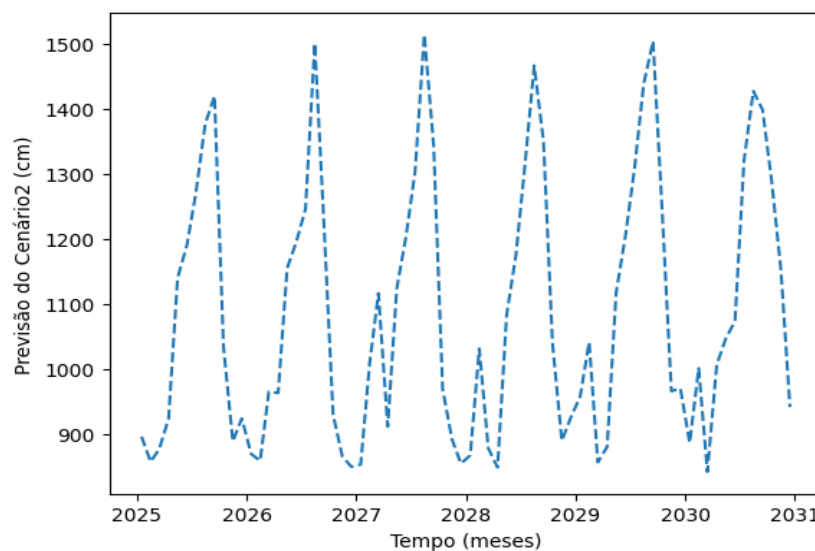
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Níveis D'água Simulados

Os resultados obtidos revelaram informações importantes sobre as variações climáticas esperadas e os possíveis impactos na navegabilidade do rio Madeira. Foram analisados tanto os dados históricos quanto as projeções futuras, a fim de identificar tendências e padrões significativos.

Com base nos dados levantados, a rede neural gerou projeções relacionadas aos níveis d'água para os períodos de 2025 a 2030, considerando os dados climáticos do CMIP6 e os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 respectivamente.

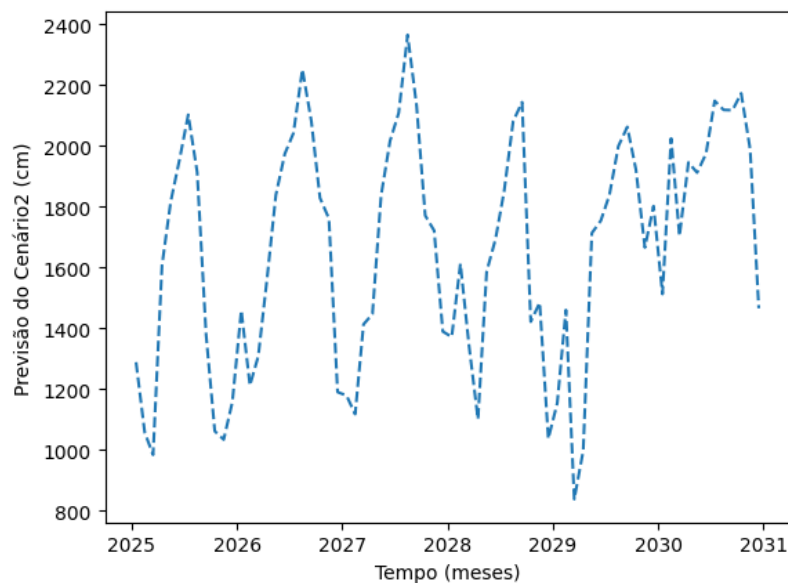
Figura 18. Projeção cota (nível) para o cenário SSP1-2.6.



Fonte: Autora.

O cenário 1 (SSP1-2.6) apresentou uma variação dos valores de cota de aproximadamente 800 cm a 1500 cm para o período projetado de 2025 a 2030. Enquanto, o cenário 2 (SSP5-8.5) os valores de cota variaram de 800 cm a 2400 cm.

Figura 19. Projeção cota (nível) para o cenário SSP5-8.5



Fonte: Autora.

Através do treinamento dessas redes com os insumos de dados adquiridos anteriormente, as RNA's foram capazes de aprender padrões e relações, permitindo a geração de previsões confiáveis e precisas, bem como observado em trabalhos posteriores (Peres, 2019; Zhou *et al.*, 2020; de Mendonça *et al.*, 2021). Outros trabalhos na realizados na região amazônica corroboraram com a confiabilidade da metodologia empregada.

Silva (2019) apresentou a proposta de um sistema de previsão de nível mensal do Rio Xingu baseado em Redes Neurais Artificiais Perceptron de Múltiplas Camadas, bem como o utilizado nessa pesquisa, para o desenvolvimento do sistema foram utilizados dados de precipitação na bacia e sub-bacias do Rio Xingu, e informações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do período de 1979 a 2016. Os resultados satisfatórios obtidos demonstram a grande aplicabilidade das Redes Neurais Artificiais para o problema de previsão de cheias, visto que comparada a outras metodologias possuem maior precisão na busca de soluções para problemas não lineares.

Figueiredo; Blanco (2019) apresentaram uma análise de modelos RNA (Redes Neurais Artificiais), tipo MLP (*Multilayers Perceptron*) na previsão de níveis de água mensais e de condições de navegabilidade, com antecedência

de vinte e quatro meses, na bacia do rio Tapajós. Como resultado das análises observou-se que o modelo RNA apresentou R^2 médio igual 0,971 e erro quadrático médio RMSE da ordem de 0,008. Com base nos resultados dessa pesquisa foram geradas ferramentas que permitiram a análise de condições de navegabilidade e o dimensionamento de obras de infraestrutura hidroviárias.

Para analisar a convergência dos dados, os resultados foram avaliados com base em métricas estatísticas. Observou-se que a arquitetura da rede neural exibiu valores relativamente reduzidos de RMSE, MSE e MAE, o que indica que as previsões dos níveis de água estão alinhadas com os valores reais. Isso demonstra que os modelos são capazes de identificar padrões e relações nos dados, gerando previsões com boa precisão. Contudo, é fundamental destacar que, mesmo com métricas de erro favoráveis, sempre existe uma margem de incerteza nas previsões. Dessa forma, é essencial levar em consideração essa variabilidade ao empregar as previsões em processos decisórios ou análises que demandem alto nível de confiabilidade.

4.2 Comparação entre os Cenários futuros SSP1- 2.6 e SSP5-8.5

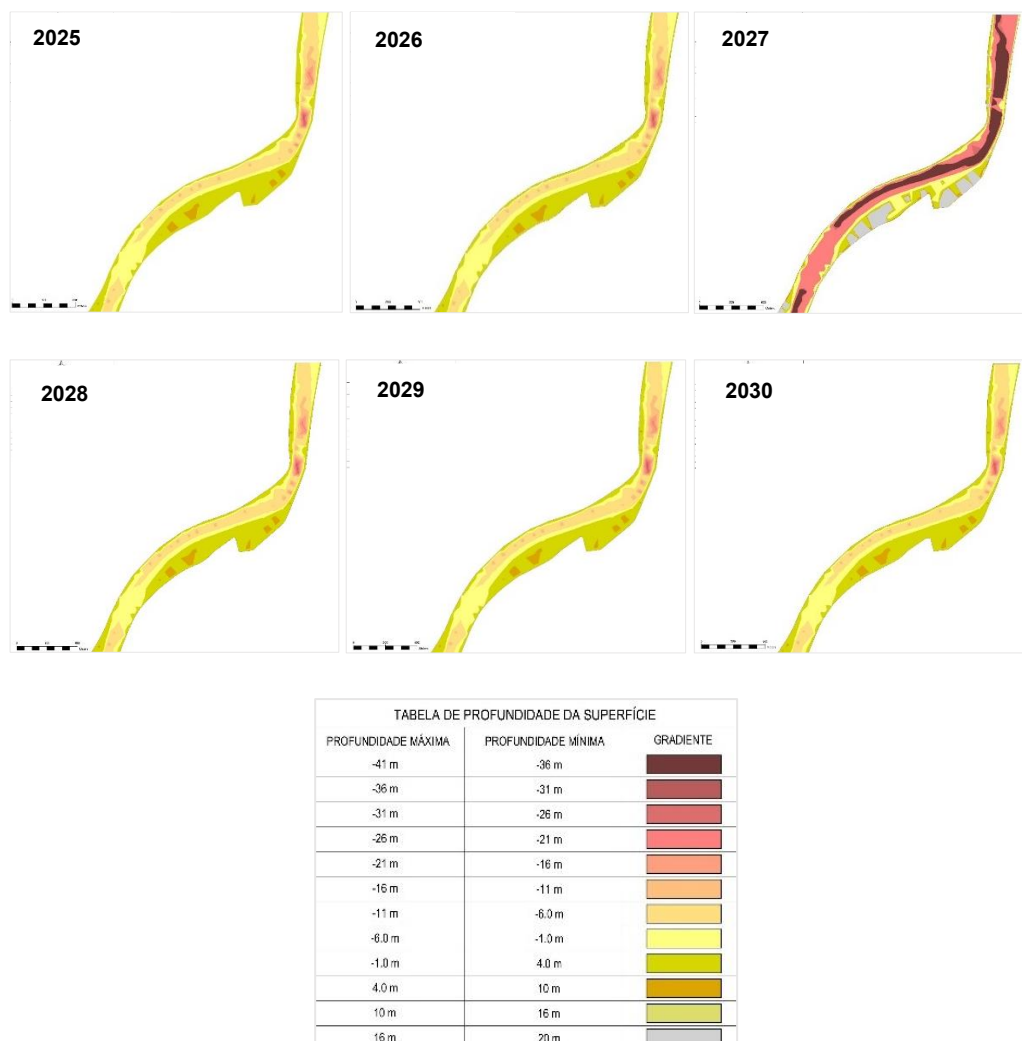
A análise das projeções climáticas de temperatura, precipitação e umidade para a região do rio Madeira revelou resultados significativos que apontam para tendências similares para os valores de cota projetadas pela rede. A partir dos dados de cota foram geradas superfícies para demonstração das profundidades do trecho do rio nos diferentes cenários analisados.

Os cenários são representações plausíveis das emissões futuras de Gases de Efeito Estufa (GEE) baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes (IPCC, 2023; SOARES, 2022). As narrativas SSP1 e SSP5 se diferem em termos de uso da terra e sistemas energéticos e em termos quantitativos sua principal distinção é quanto aos níveis de emissões futuras. Os cenários representam alterações a curto prazo, no entanto, tais alterações podem mudar em cenários de longo prazo.

O cenário SSP1-2.6 representa uma trajetória de desenvolvimento sustentável, com redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa,

implementação de políticas ambientais eficazes e transição para uma matriz energética mais limpa (IPCC, 2023). Nesse contexto, os impactos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico são menos intensos em comparação com cenários de altas emissões, como o SSP5-8.5. Assim, a variação no nível d'água do Rio Madeira tende a ser mais moderada, com menor frequência de eventos extremos de cheia e seca, assim como apresentada nos mapas a seguir nos anos de 2025 a 2030.

Figura 20. Projeção do cenário SSP1-2.6 para os anos de 2025 a 2030.



Fonte: Autora

A menor concentração de gases de efeito estufa nesse cenário impacta diretamente a evapotranspiração e os padrões de precipitação. A menor elevação das temperaturas também reduz a taxa de evaporação, garantindo maior estabilidade hídrica na bacia.

Em termos hidrológicos, o SSP1-2.6 favorece uma maior previsibilidade dos níveis d'água, reduzindo a ocorrência de secas severas ou inundações extremas (SOARES, 2022). Isso contribui para a segurança da navegação fluvial, garantindo melhores condições para o transporte aquaviário e reduzindo impactos negativos sobre a infraestrutura hidroviária e as comunidades ribeirinhas. Além disso, a menor variabilidade climática preserva o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e diminui a erosão das margens do rio.

Dessa forma, o cenário SSP1-2.6 reforça a importância da adoção de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, evidenciando que políticas sustentáveis podem resultar em um regime hidrológico mais estável e previsível, beneficiando tanto a segurança hídrica quanto as atividades econômicas e ambientais ao longo do Rio Madeira.

Figura 21. Projeção do cenário SSP5-8.5 para os anos de 2025 a 2030.

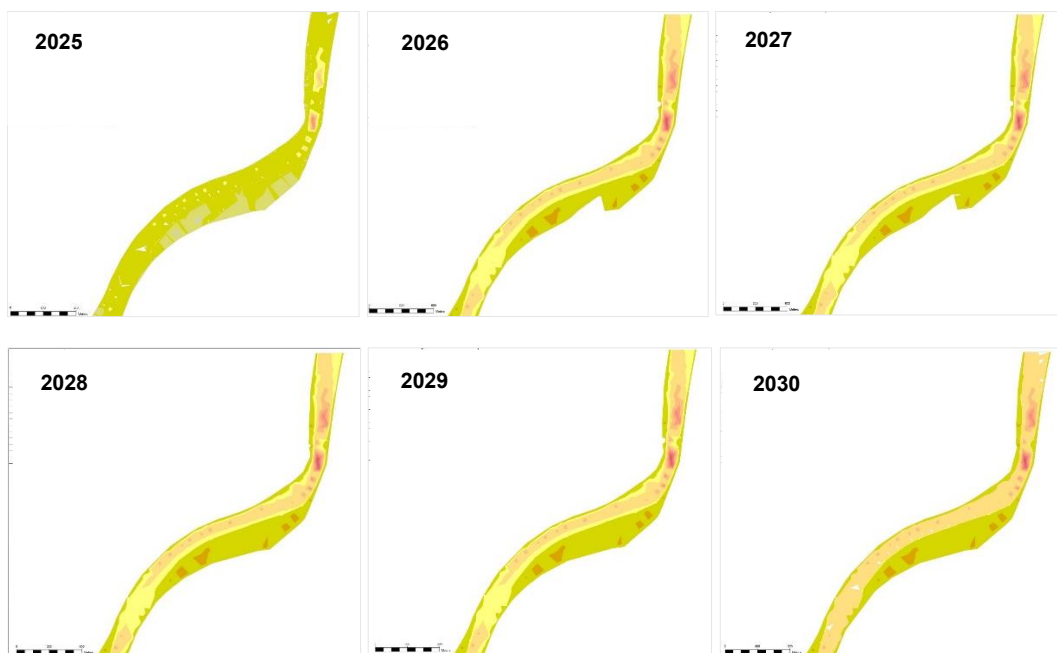


TABELA DE PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE		
PROFUNDIDADE MÁXIMA	PROFUNDIDADE MÍNIMA	GRADIENTE
-41 m	-36 m	
-36 m	-31 m	
-31 m	-26 m	
-26 m	-21 m	
-21 m	-16 m	
-16 m	-11 m	
-11 m	-6.0 m	
-6.0 m	-1.0 m	
-1.0 m	4.0 m	
4.0 m	10 m	
10 m	16 m	
16 m	20 m	

Fonte: Autora

No cenário SSP5-8.5, nos anos de 2025 a 2030, foram observadas mudanças significativas nas condições do trecho analisado, em especial para o aumento das profundidades e a redução das áreas rasas. O aumento do nível d'água no Rio Madeira no cenário climático SSP5-8.5 pode ser explicado pela intensificação de processos climáticos relacionados ao aquecimento global. O SSP5-8.5 é caracterizado por altas emissões de gases de efeito estufa, rápido crescimento econômico baseado em combustíveis fósseis e mudanças significativas nos padrões climáticos globais (Tebaldi *et al.*, 2021). Esse cenário leva a alterações no ciclo hidrológico que afetam diretamente os níveis dos rios, incluindo o Rio Madeira.

Entre os principais fatores responsáveis por essa elevação no nível d'água, destaca-se o aumento da precipitação extrema, que intensifica o escoamento superficial e reduz a capacidade de infiltração do solo, contribuindo para enchentes mais frequentes. Além disso, mudanças nos padrões sazonais podem prolongar a estação chuvosa ou concentrar chuvas intensas em períodos curtos, elevando ainda mais os volumes de água no rio (Teixeira, 2023; Zheng *et al.*, 2024). O aquecimento global também impacta a evapotranspiração e a umidade atmosférica, criando um ciclo de retroalimentação que favorece a intensificação das chuvas na região (Penna, 2024).

Embora o aumento da intensidade das chuvas e níveis d'água possam favorecer temporariamente a navegação em algumas áreas, a instabilidade do regime hidrológico e os eventos extremos frequentes apresentam desafios significativos para o transporte aquaviário. Além disso, as comunidades ribeirinhas e os ecossistemas associados ao Rio Madeira podem ser particularmente vulneráveis às alterações nos padrões hidrológicos (Correia Filho *et al.*, 2024). Assim, esses resultados destacam a necessidade de estratégias de adaptação, como melhorias na infraestrutura de transporte, implementação de sistemas de alerta para eventos extremos e o manejo integrado da bacia hidrográfica para lidar com os impactos das mudanças climáticas.

5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa analisou os impactos das mudanças climáticas no transporte aquaviário do Rio Madeira a partir da projeção de diferentes cenários climáticos. Utilizando os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, os resultados indicaram que as variações nos níveis d'água do rio estão diretamente associadas a mudanças nos padrões de precipitação, temperatura e umidade. No cenário SSP5-8.5, marcado por altas emissões de gases de efeito estufa, observou-se um aumento significativo nos níveis d'água, impulsionado por precipitações mais intensas e alterações nos ciclos hidrológicos. Esse aumento pode resultar em enchentes mais frequentes, erosão das margens e desafios operacionais para o transporte fluvial e a infraestrutura hidroviária da região.

Por outro lado, o cenário SSP1-2.6, que representa uma trajetória sustentável, apresentou menor variação nos níveis d'água, indicando maior estabilidade hidrológica e redução da ocorrência de eventos extremos. Isso favorece a navegabilidade do Rio Madeira, proporcionando melhores condições para o transporte aquaviário e menor impacto sobre comunidades ribeirinhas e infraestruturas hidroviárias.

Os resultados reforçam a necessidade de planejamento e adaptação do setor hidroviário diante das mudanças climáticas. Estratégias como monitoramento contínuo dos níveis d'água, aprimoramento da infraestrutura portuária e desenvolvimento de políticas de mitigação podem contribuir para a resiliência do transporte aquaviário na região. Além disso, a integração de novas metodologias de modelagem climática e a ampliação de séries históricas podem fornecer subsídios mais relevantes para a gestão dos impactos futuros.

Diante disso, conclui-se que as mudanças climáticas terão um papel crucial na dinâmica do transporte aquaviário do Rio Madeira, e ações proativas são essenciais para garantir a segurança e a eficiência desse modal no contexto de um clima em transformação.

REFERENCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). **Anuário Estatístico 2024**. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2023. Disponível em: <https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt>. Acesso em: 20 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ) (2023). Relatório Concessão da Hidrovia do Rio Madeira. Disponível em: http://web.antaq.gov.br/Sistemas/WebServiceLeilao/DocumentoUpload/Audiencia%20153/HMD_Secao_C_Engenharia_f1_rev1.pdf. Acesso em: 28 de outubro de 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS (Brasil). VEN 2020 – Vias economicamente navegadas. / Agência Nacional de Transportes Aquaviários. --Brasília: ANTAQ, 2021. 25p.:il.

ADAMY, Amilcar. Dinâmica fluvial do Rio Madeira. In: SILVA, Ricardo Gilson da Costa (Org.). Porto Velho: cultura, natureza e território. Porto Velho: Temática; Edufro, 2016. p. 120-147

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017.

AGUIAR, R. S., ROCHA, E. J. P. da, SOUZA JUNIOR, J. A. de, SANTOS, J. T. S. dos, DOS SANTOS, J. S. (2019). **Análise de Componente do Regime Hidrológico da Bacia do Rio Amazonas em Anos de Eventos Climáticos**. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 12(3), 988–1002. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p988-1002>.

AGGARWAL, C. C. (2018). *Neural Networks and Deep Learning: A Textbook*, First edition, Springer (2018).

ALVES, L. G. S., Senna, R., Santos, M. S., & da Rocha, C. B. inundação do estado do amazonas em 2021. *desastres e água*. Inundação do estado do Amazonas em 2021: aspectos climatológicos e hidrológicos III END - Encontro Nacional de Desastres da ABRHidro. Niterói-RJ. ISSN: 2764-9040 <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14510>

ABEL, E. L. da S. Dinâmica ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Juruá na Amazônia Ocidental. 2019. 59 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2019.

ALENCAR, D. G. da S.; COSTA, F. S. da. Resiliência pedagógica: escolas ribeirinhas frente às variações de seca e cheia do Rio Amazonas. **Educação e Pesquisa**, v. 47, p. e230347, 2021.

ARTAXO, Paulo. Biomas brasileiros e as mudanças climáticas: Políticas de adaptação ao novo clima, consequentes e baseadas em ciência, são necessárias e urgentes. **Ciência e Cultura**, v. 75, n. 4, p. 01-08, 2023.

ARALDI, A. da S. R. S. 2023. Circuito do transporte rodoviário de carga na BR 163: reestruturação e consolidação do arco norte. Dissertação de mestrado Universidade Federal De Rondonópolis, Campus Universitário De Rondonópolis, Programa De Pós-Graduação Em Geografia.146p. 2023

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil) (ANA). Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – Brasília, 2024.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC. Brasília, DF, (2023).

BORGES, H.M., CAMPOS FILHO, L.C.P., DE FIGUEIREDO, N.M., SAAVEDRA, R.S., LAMEIRA. (2021). **Modeling of navigability conditions of rivers in the Amazon and the occurrence of ENSO events**. 10.1201/9781003216599-79.

BLANCO, C., SOARES, A. D. C. L., LOBATO, A. K. R., & da Silva Cruz, J. (2023). **Precipitação em cenários climáticos futuros para usos de recursos hídricos em pequenas bacias hidrográficas da Amazônia**. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*. 2023.

BIER, Anderson Augusto. **Changes in the South Atlantic Dipole and impacts on the climate of South America under the aspect of climate change**. 2023. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. doi:10.11606/T.14.2023.tde-04032024-194824. Acesso em: 2024-10-25.

BRÊDA, J.P.L.F., DE PAIVA, R.C.D., COLLISCHON, W. **Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections**. *Climatic Change* **159**, 503–522 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

BORGES, A. BR-319, a estrada da discórdia na Amazônia. *O Eco. Brasil*. São Paulo, 14 de outubro de 2024. Disponível em:<https://oeco.org.br/reportagens/br-319-a-estrada-da-discordia-na-amazonia/>. Acesso em: 06 de dezembro de 2024.

BRANDÃO, D. O., ARIEIRA, J., NOBRE, C. A. (2024). Impactos das mudanças climáticas na sociobioeconomia da Amazônia. **Estudos Avançados**, 38(112),249-270.

BORMA, Laura De Simone; NOBRE, Carlos Afonso. **Secas na Amazônia: causas e consequências**. Oficina de Textos, 2013.

CAMARGO, M. G. P. D. (2019). Variabilidade da vazão do Rio Xingu na região da UHE Belo Monte sob cenários de projeções multimodelo de mudança climática (Dissertação, Universidade de São Paulo).

CAVALCANTE, R. B. L., Ferreira, D. B. da Silva, Pontes, P. R. M., Tedeschi, R.G da Costa, C.P. W, de Souza, E. B. **Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia**, *Atmospheric Research*, Volume 238, 2020, 104879, ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879>.

COSTA, G. K. L., BLANCO, C. J. C., SOARES, A. C. L., CRUZ, J. S., & MENDONÇA, L. M. (2023). **Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento**. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 20, e6. <https://doi.org/10.21168/reg.a.v20e6>.

CALDATTO, I. R., BECKER, A. C. C, BLENINGER, T., POLLI, B. A., DARU R. L., PENTEADO, R., FREITAS, C. **Characterization of woody material transport on the Madeira River at the Jirau Hydroelectric Power Plant: a study using a three-dimensional particle model**. RBRH. 2024. Journal article DOI: [10.1590/2318-0331.292420230128](https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230128)

CREECH, C. T., AMORIM, R. S., LAUTH, T. J., OSÓRIO, A. L. N. A. Development of a Sustainable Waterway Masterplan on an Amazon Megariver: The Madeira River, Brazil. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, USA, v. 147, n. 5, p. 502-1007, 2021.

CHAO, J., Fan, G., & Ding, R. (2021). Influência do Dipolo Norte-Americano no início do ENSO conforme simulado por um modelo acoplado oceano-atmosfera. *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 100058. <https://doi.org/10.1016/J.AOSL.2021.100058>.

COUTINHO, E. D. C., ROCHA, E. D., LIMA, A. M. M., RIBEIRO, H. M. C., GUTIERREZ, L. A. C. L., Barbosa, A. J. S., TAVARES, P. A. (2018). Variabilidade climática da precipitação na bacia amazônica brasileira entre 1982 e 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, 22, 476-500.

COSTA SILVA, R. G. da; DA SILVA, V. V.; LIMA, L. A. P. Os novos eixos da fronteira na Amazônia ocidental (2019). <https://doi.org/10.4000/confins.24950>.

CASTRO DE JESUS, A. B., NETO, T. O., & ARAÚJO DA SILVA, F. B. (2023). Rede urbana e frentes pioneiras no sul do Amazonas: rodovias Transamazônica (BR-230) e Manaus-Porto Velho (BR-319). **Boletim Paulista De Geografia**, 1(108), 132–148. <https://doi.org/10.54446/bpg.v1i108.2864>

CASTRO, M. P.; SOUZA, M. M. F.; DOS SANTOS, J. W. Barbosa. Relações entre as temperaturas superficiais do oceano atlântico sul e as variações

anômalas do el nino período 1950 a 2016. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, p. 37-44, 2019.

CEVALHO, W., ANDREOLI, R. V., CERÓN, W. L., DE OLIVEIRA, M. B. L., JIMENEZ, L. C. M., DE SOUZA, R. A. F., KAYANO, M. T. (2024). Frequência de eventos extremos diários de precipitação em Manaus–AM e suas relações com o El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 17(1), 4-99.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL (CNA). 2022. CNA e entidades visitam sistema portuário de Porto Velho. Sistema CNA / SENAR / Instituto CNA- Brasília - Distrito Federal.

CORREIA FILHO, WLF, GOBO, JPA, OLIVEIRA-JÚNIOR, JF, MENDES, D., GOIS, G. (2024). Prevendo o cenário futuro de chuvas na Amazônia brasileira e seus impactos socioeconômicos. In: Mishra, M., de Lucena, AJ, Maharaj, B. (eds) **Mudanças climáticas e sistemas socioeconômicos regionais no Sul global**. Springer, Cingapura. https://doi.org/10.1007/978-981-97-3870-0_9

DA SILVA SANTOS, M. R., BRAGA, T. G. M., RABELO, D. R., QUARESMA, M. D. N. S. 2022. As projeções climáticas como instrumento para a gestão dos impactos ambientais nos municípios costeiros do estado do Pará.

DA SILVA, S. S., BROWN, F., DE OLIVEIRA SAMPAIO, A., SILVA, A. L. C., DOS SANTOS, N. C. R. S., LIMA, A. C., FEARNSIDE, P. M. (2023). **Amazon climate extremes: Increasing droughts and floods in Brazil's state of Acre**. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 21(4), 311-317.

DA SILVA LINDEMANN, D. *et al.* Oscilações decadais da temperatura do ar na América do Sul durante o período de verão austral e suas relações com o Oceano Atlântico Norte. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 06, p. 2163-2176, 2019.

DE SOUZA, R. M., VIOLA, M. R., CHOU, S. C., ALVES, M. V. G., & AVANZI, J. C. (2019). Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos Cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, 24.

DE SOUZA COSTA, C. E. A., BLANCO, C. J. C., e de OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. (2021). **Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River**. *Climatic Change*, 166(3), 45.

DE SOUZA COSTA, C. E. A., BLANCO, C. J. C., e de OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. (2020). **IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil**. *Journal of and Climate Change*, 11(3), 760-770.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Inicia novo ciclo de dragagem no Rio Madeira**. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt->

br/assuntos/noticias/dnit-inicia-novo-ciclo-de-dragagem-no-rio-madeira. Acesso em: 20 Jan 2022.

DE SOUZA, V. A. S., MOREIRA, D. M., ROTUNNO FILHO, O. C., e RUDKE, A. P. (2020). **Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira River basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100316.**

DOS SANTOS SILVA, FD; da Costa, CPW; dos Santos Franco, V.; Gomes, HB; da Silva, MCL; dos Santos Vanderlei, MHG; Costa, RL; da Rocha Júnior, RL; Cabral Júnior, JB; dos Reis, JS; e outros. Intercomparação de Diferentes Fontes de Dados de Precipitação na Amazônia Legal Brasileira. *Clima* **2023**, 11, 241. <https://doi.org/10.3390/cli11120241>

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Inicia novo ciclo de dragagem no Rio Madeira. Brasília: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-novo-ciclo-de-dragagem-no-rio-madeira>. Acesso em: 20 jan.2022.

DI BELLA, G. Cheias recordes atingiram cidades na bacia amazônica este ano – mas a vida seguiu. *National Geographic Brasil*. São Paulo, 06 out. 2021. Disponível em: <https://www.nationalgeographicbrasil.com/meio-ambiente/2021/09/cheias-recordes-atingiram-cidades-na-bacia-amazonica-este-ano-mas-a-vida-seguiu>. Acesso em: 11 setembro de 2024.

DE SOUZA AGUIAR, R., DA ROCHA, E. J. P., DE SOUZA JÚNIOR, J. A., DOS SANTOS, J. T. S., DOS SANTOS, J. S. (2019). Análise de componente do regime hidrológico da bacia do rio Amazonas em anos de eventos climáticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 12(03), 988-1002.

DE SOUZA COSTA, C. E. A.; BLANCO, C. J. C.; DE OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. *Climatic Change*, v. 166, n. 3, p. 45, 2021.

DE ALBUQUERQUE CAVALCANTI, I. F.; FERREIRA, N. J. **Clima das regiões brasileiras e variabilidade climática**. Oficina de Textos, 2021

ESPINOZA, J. C., MARENGO J. A., RONCHAIL J., MOLINA-CARPIO J., FLORES L. N., e GUYOT J. L. **The extreme 2014 flood in southwestern Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient**, *Environ. Res. Lett.*, vol. 9, no. 12, p. 124007, 2014.

ESPINOZA, J.C., MARENGO, J.A; RONCHAIL, J.; MOLINA, J.; NORIEGA, L.; GUYOT, J.L. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: The role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environmental Research Letters*, v. 9, n. 12, p. 124007, 2014.

ESPINOZA, J. C., SÖRENSSON, A. A., RONCHAIL, J., MOLINA-CARPIO, J., SEGURA, H., GUTIERREZ-CORI, O., WONGCHUIG-CORREA, S. (2019). Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26, 100637.

FLECK, L., TAVARES, M. H. F., EYNG, E., HELMANN, A. C., & ANDRADE, M. A. D. M. (2016). Redes neurais artificiais: Princípios básicos. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, 1(13), 47-57.

FIORIN, D. V.; MARTINS, F. R.; SCHUCH, N. J.; PEREIRA, E. B. **Aplicações de Redes Neurais e Previsões de Disponibilidade de Recursos Energéticos Solares**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, 2011.

FIGUEIREDO, N.; BLANCO, C. Redes neurais artificiais na previsão de níveis de água e de navegabilidade na bacia do rio tapajós-Amazônia. (2019).

FILIZOLA, N.; LATRUBESSE, E. M.; FRAIZY, P.; SOUZA, R.; GUIMARÃES, V.; e GUYOT, J.L. **Was the 2009 flood the most hazardous or the largest ever recorded in the Amazon?** *Geomorphology*, vol. 215, pp. 99–105, jun. 2014.

FAWZY, S., OSMAN, A., DORAN, J., e ROONEY, D., 2020. Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, pp. 2069 - 2094. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>.

FLEISCHMANN, A. S., PAPA, F., FASSONI-ANDRADE, A. C., HAMILTON, S. K., CORREA, S. W., NASCIMENTO, A. Z. A., COLLISCHONN, W. (2023). De inundações extremas a terras caídas: mapeando desastres no Rio Amazonas através de satélites e modelagem hidrológica. Encontro Nacional de Desastres (3.: 2023: Niterói, RJ). Eventos extremos e sociedade sob a perspectiva das mudanças climáticas [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro 2023.

GAMA, C.H.A.; PAIVA, R.C.D, COLLISCHONN, W. Flow forecast system based on lumped hydrological model, data assimilation and meteorological forecasts. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. v. 18, n. 3. p. 111-129, 2019.

GOMES, W. D. B., CORREIA, F. W. S., CAPISTRANO, V., VEIGA, J. A. P., VERGASTA, L. A., CHOU, S. C., ... e ROCHA, V. M. (2020). Avaliação dos Impactos das Mudanças na Cobertura da Terra e Cenário de Emissões (RCP 8.5) no Balanço de água na Bacia do Rio Madeira. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 689-702.

GOMES, D. J. C., Beltrão, N. E. S., Dias, Y. A. S., & Maia, E. T. (2024). Eventos de inundação em anos extremos de Dipolo do Atlântico e La Niña no Arquipélago do Marajó. *Revista Brasileira De Climatologia*, 35(20), 378–400. <https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.17577>

HU, S.; FEDEROV, A. V. **Exceptionally strong easterly wind burst stalling El Niño of 2014**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 113, n. 8, p. 200–2010, 2016.

HERMANS, T., GREGORY, J., PALMER, M., RINGER, M., KATSMAN, C., e SLANGEN, A. (2021). Projeção da mudança global do nível médio do mar usando modelos CMIP6. **Geophysical Research Letters** ,48. <https://doi.org/10.1029/2020GL092064> .

HAYKIN, S. Redes Neurais- Princípios e Práticas. BOOKMAN, São Paulo, 2ª ed. 2001. 900 p.

HU, S.; FEDEROV, A. V. **Exceptionally strong easterly wind burst stalling El Niño of 2014**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 113, n. 8, p. 200–2010, 2016.

IPCC, 2023: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE) CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 10 de novembro de 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA. Cheia no rio Madeira. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações – Brasília, 2014. Disponível em: [https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/Mad/Outros%20documentos/Technical%20papers/Cheia do rio Madeira-16 09 11h00 delfino luiz.pdf](https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/Mad/Outros%20documentos/Technical%20papers/Cheia%20do%20rio%20Madeira-16%2009%2011h00%20delfino%20luiz.pdf). Acesso em: 17 de setembro de 2024.

JEFFRY, L., ONG, M., NOMANBHAY, S., MOFIJUR, M., MUBASHIR, M., e SHOW, P. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. *Fuel*, 301, 121017. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121017>.

JIANG, L., ; Li, T. (2021). Impactos das anomalias de TSS do Atlântico Norte Tropical e do Atlântico Equatorial no ENSO. *Journal of Climate*, -1, 1-58. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0835.1>

LÓPEZ, K. L. C. **Interannual variability of Tropical Atlantic and its influence on extreme precipitation events: Focus on the Amazon Basin**. 2020. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. doi:10.11606/D.14.2020.tde-27072020-135440. Acesso em: 2024-10-25.

LAUREANTI, N. C., TAVARES, P. D. S., TAVARES, M., RODRIGUES, D. C., GOMES, J. L., CHOU, S. C., CORREIA, F. W. S. (2024). Extreme Seasonal Droughts and Floods in the Madeira River Basin, Brazil: Diagnosis, Causes, and Trends. *Climate*, 12(8), 111.

LUCAS, E. W. M. **Regionalização dos impactos das mudanças climáticas nos regimes de chuva e vazão na bacia hidrográfica do Xingu**. 2022. 153 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

LOUREIRO, L. D. S., Maciel, J. S. C., Senna, R. C., & Santos, A. L. M. R. D. (2024). A estiagem de 2023 como evento hidrológico severo na bacia do Amazonas. Ensus - Encontro de sustentabilidade em projeto 2024 - XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto.

LOPES, I. de M. O., MAGALHÃES, M. T. Q. Hidrovia do Rio Madeira como indutor de desenvolvimento microrregional das comunidades tradicionais do Baixo Madeira em Porto Velho. **Paranoá: Cadernos De Arquitetura E Urbanismo**, n.22, p.143–158, 2018. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/25676>. Acesso em: 23 jan. 2022.

MARENGO, José A.; SOUZA JUNIOR, C. Mudanças Climáticas: impactos e cenários para a Amazônia. **São Paulo: Alana**, 2018.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; e RODRIGUEZ, D. A. **The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region**, *Geophysics. Res. Lett.*, vol. 38, no. 12, p. 12703, 2011.

MENDONÇA, L.M., GOMIDE, I.S., SOUSA, J.V., & BLANCO, C.J.C. (2021). **Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia**. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 18, e2. <https://doi.org/10.21168/reg.v18e2>.

MARENGO, J. A.; BORMA, L. S.; RODRIGUEZ, D. A.; PINHO, P. F.; SOARES W., e ALVES; L. M. **Recent extremes of drought and flooding in Amazonia: Vulnerabilities and human adaptation**. *Climate Change*, vol. 2, no. 2, pp. 87–96, 2013.

MARENGO, J.A., WILLIAMS, E.R., ALVES, L.M., SOARES, W.R., RODRIGUEZ, D.A. (2016). **Extreme Seasonal Climate Variations in the Amazon Basin: Droughts and Floods**. In: Nagy, L., Forsberg, B., Artaxo, P. (eds) *Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin*. Ecological Studies, vol. 227. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_4

MONTEIRO, R. M. L., DOS SANTOS, F. A. A., ROLIM, P. A. M., JOSÉ, C. E. C. B. E., e da ROCHA, P. (2024). **Modelagem Estatística Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(2), 1158-1173.

MATOS, A. J. S., OLIVEIRA, B. L. F. D., ALVES, L. G. S., & SANTOS, M. S. (2021). *Sistema de Alerta Hidrológico do Amazonas: relatório técnico de operação do ano de 2021*. CPRM.

MOREIRA, S. DE F., CONCEIÇÃO, C. S. DA, CRUZ, M. C. S. DA, & PEREIRA JÚNIOR, A. (2018). A Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a dinâmica climática da região Amazônica. **Multidisciplinary Reviews**, 1, e2018014. <https://doi.org/10.29327/multi.2018014>

MAGNAN, A., PÖRTNER, H., DUVAT, V., GARSCHAGEN, M., GUINDER, V., ZOMMERS, Z., HOEGH-GULDBERG, O.; GATTUSO, J. (2021). Estimativa do risco global de mudanças climáticas antropogênicas. **Nature Climate Change** 11, 879 - 885. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01156-w> .

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC.

MARENGO, J. Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (Iphan). Cenários futuros de clima e impactos. Ciclo de Diálogos - Patrimônio Cultural e Ações Climáticas. Disponível em: https://www.gov.br/iphan/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/ciclo-de-dialogos-patrimonio-cultural-e-acoes- / climaticas JosMarengo_28.05.pdf. Acesso em: 20/10/2024.

OLIVEIRA, R. N. de. A variabilidade da chuva na Amazônia Central: El Niño e La Niña. 2019. 117 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

Plano Anual de Dragagem de Manutenção Aquaviária (PADMA). Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/plano-anual-de-dragagem-de-manutencao-aquaviaria padma#:~:text=O%20Plano%20Anual%20de%20Dragagem,correntes%20para%20garantir%20seguran%C3%A7a%20e>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.

Plano de Monitoramento Hidrográfico (PMH). Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/plano-de-monitoramento-hidroviario-pmh>. Acesso em: 10 de dezembro de 2024.

Plano de Desenvolvimento e Zoneamento (PDZ) - Porto de Porto Velho. Sociedade de Portos e Hidrovias do Estado de Rondônia – SOPH, Autoridade Portuária. 2022.

PERES, V. C. da. **Sistema hidrológico para previsão de risco na Amazônia utilizando redes neurais artificiais**. 2019. 124 f. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11837>. Acesso em: 10 de setembro de 2024.

ROCHA, Vinícius Machado; CORREIA, Francis Wagner Silva; GOMES, W. B. Avaliação dos impactos da mudança do clima na precipitação da Amazônia utilizando o modelo RCP 8.5 Eta-HadGEM2-ES. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 06, p. 2051-2065, 2019.

PEDERSEN, J., SANTOS, F., VUUREN, D., GUPTA, J., COELHO, R., APARÍCIO, B., & SWART, R. (2021). Uma avaliação do desempenho de cenários em relação às emissões globais históricas para relatórios do IPCC. **Mudança Ambiental Global**. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199> .

PBMC/BPBES, 2018: Potência Ambiental da Biodiversidade: um caminho inovador para o Brasil. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas e da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecosistêmicos. 1ª edição [Scarano, F.R., Santos, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

PMEL. Pacific Marine Environmental Laboratory. 2024. National Oceanic and Atmospheric Administration | El Niño Theme Page. Disponível em: <https://www.pmel.noaa.gov/elniño/>. Acesso em: 24 de novembro de 2024.

PARSONS, L. (2020). Implicações das tendências de secagem projetadas pelo CMIP6 para o risco de seca na Amazônia no século XXI. **Earth's Future**. 8. <https://doi.org/10.1029/2020EF001608> .

PENNA, A.C. Caracterização de bloqueios de sistemas atmosféricos no Sudeste do Brasil no verão: observações e cenários futuros utilizando as projeções de modelos do CMIP6. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, INPE, 2024.

PACA VHdM, Espinoza-Dávalos GE, Moreira DM, Comair G. **Variabilidade das tendências de precipitação na bacia do rio Amazonas determinada a partir do produto de precipitação CHIRPS e de registros de estações**. *Água*. 2020; 12(5):1244. <https://doi.org/10.3390/w1205124>

PEIXOTO, J. S., DE MORAES, M. A. E., & GARCIA, K. (2024). Performance analysis of the lisflood hydrological model in a flood event in the Madeira river basin. **Int J Hydro**, 8(2), 38-43.

PEDREIRA JUNIOR, A. L., QUERINO, C. A. S., BIUDES, M. S., MACHADO, N. G., SANTOS, L. O. F. D., e IVO, I. O. (2020). **Influence of El Niño and La Niña phenomena on seasonality of the relative frequency of rainfall in southern Amazonas mesoregion.** *RBRH*, 25, e24.

RUEZZENE, C. B., MIRANDA, R. B. DE, TECH, A. R. B., MAUAD, F. F. (2021). PREENCHIMENTO DE FALHAS EM DADOS DE PRECIPITAÇÃO ATRAVÉS DE MÉTODOS TRACIONAIS E POR INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL. **Revista Brasileira De Climatologia**, 29. <https://doi.org/10.5380/rbclima.v29i0.75476>

RIBEIRO, G., ANDERSON, L., BARRETOS, N., ABREU, R., ALVES, L., DONG, B., LOTT, F., TETT, S. (2021). Atribuindo a seca da bacia amazônica de 2015/2016 à influência antropogênica. **Resiliência e sustentabilidade climática.** <https://doi.org/10.1002/cli2.25> .

RIVERA, J. A., ARNOULD, G. (2020). Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). **Atmospheric Research**, 241, 104953. 53 <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953>.

RIBEIRO, G., ANDERSON, L., BARRETOS, N., ABREU, R., ALVES, L., DONG, B., LOTT, F., TETT, S. (2021). Atribuindo a seca da bacia amazônica de 2015/2016 à influência antropogênica. **Resiliência e sustentabilidade climática.** <https://doi.org/10.1002/cli2.25> .

REBOITA, M. S., OLIVEIRA, K. R., Corrêa, P. Y. C., & Rodrigues, R. (2021). Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 14(2), 729-742.

SERRÃO, E. A. de O. **Impactos das mudanças climáticas e do uso da terra na produção hidrelétrica na Amazônia Oriental.** 2022. 131 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

SANTOS NETO, L. A. DOS MANIESI, V., QUERINO, C. A. S., SILVA, M. J. G. da, e BROWN, V. R. (2021). **Modelagem Hidroclimatologica Utilizando Redes Neurais Multi Layer Perceptron Em Bacia Hidrográfica No Sudoeste Da Amazônia.** *Revista Brasileira De Climatologia*, 26. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.73007>.

SAPUCCI, CR, Mayta, VC & da Silva Dias, PL. Avaliação de dados de precipitação de base diversa na Região Amazônica. *Theor Appl Climatol* 149, 1167–1193 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04087-4>

SHIOGAMA, H., TATEBE, H., HAYASHI, M., ABE, M., ARAI, M., KOYAMA, H., . WATANABE, M. (2023). MIROC6 Large Ensemble (MIROC6-LE): Projeto experimental e análises iniciais. **Earth System Dynamics Discussions** , 2023 , 1-28.

SORÍ, R.; MARENGO, J.A.; NIETO, R.; DRUMOND, A.; GIMENO, L. **The Atmospheric Branch of the Hydrological Cycle over the Negro and Madeira River Basins in the Amazon Region.** *Water* **2018**, *10*, 738. <https://doi.org/10.3390/w10060738>

SOARES, W. Cenários de Mudanças Climáticas. **IEC-ES**, v. 8, n. 5, p. 2003–2005, 2022

SUEDEL, B. C., AMORIM, R. S., LAUTH, T. J., e CREECH, C. T. (2022). **Nature-based solutions for improving navigation reliability on the Madeira River, Brazil.** *Integrated Environmental Assessment and Management*, *18*(1), 115-122.

SILVA, Christian Pascal Bouix **Modelagem de redes neurais artificiais MLP para previsão de vazões na bacia do rio Miranda afluente do Pantanal.** Piracicaba, 2024. 67 p. Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SILVA, M. A. P. da. **Influência dos eventos hidrológicos extremos nas estratégias adaptativas das comunidades ribeirinhas da RDS do rio Madeira.** 2022. 211 f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2022.

SILVA, Arilson Galdino da. **Modelo de previsão hidrológica utilizando redes neurais artificiais: um Estudo de caso na Bacia do Rio Xingu – Altamira-PA / Arilson Galdino da Silva - 2019.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

SOARES, Áurea Camila Muniz. **Influência de fenômenos climáticos sobre o regime hidrológico no médio rio Negro (Amazonas – Brasil).** 2022. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2022.

SOUZA, V. A. S. de, MOREIRA, D. M., FILHO, O. C. R., RUDKE, A. P. **Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira river basin,** *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, Volume 18, 2020, 100316, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938519303507>)

SOARES, A. C. **Análise de séries temporais com uso de redes neurais artificiais em dados meteorológicos para previsão de chuva e eventos climáticos severos.** 2022. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da

Computação) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. DOI <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2022.680>.

SILVA, I. N. da; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. Artliber, 2016. 431 p.

SILVA, Christian Pascal Bouix Modelagem de redes neurais artificiais MLP para previsão de vazões na bacia do rio Miranda afluente do Pantanal. Piracicaba, 2024. 67 p. Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

SIQUEIRA JÚNIOR, 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, n. 1-2, p. 117-129, 2015.

SAMPAIO, R. (2024). As Mudança De Níveis De Água (1995-2021) No Estuário Superior Do Rio Amazonas (Baixo Amazonas - Pará): Possíveis Fatores Climáticos: Amazon Basin. *Cadernos De Geociências*, 19. <https://doi.org/10.9771/geocad.v19i0.57375>

SILVA, W. C. da. Climatologia dos eventos extremos diários de precipitação sobre a Amazônia Central e Colômbia e suas relações com as fases do El Niño-oscilação sul /. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Clima e Ambiente - Cliamb) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2022. Manaus, 2022. 128 p.

SHI, M., LIU, J., WORDEN, J., BLOOM, A., WONG, S., FU, R. (2019). O efeito legado da seca da Amazônia de 2005 atrasou o início da estação chuvosa de 2006. **Geophysical Research Letters** 46, 9082 - 9090. <https://doi.org/10.1029/2019GL083776> .

SILVA, N. C. da. Eventos extremos na Amazônia e seus efeitos na dinâmica hidrológica do rio e lagos de várzea amazônicos. 2020. 157 f. Dissertação (mestrado do programa de pós-graduação em Clima e Ambiente – (CLIAMB). INPA, Manaus, 2020.

TEIXEIRA, Letícia Costa Correa e Castro. Mudanças climáticas no estado do Rio de Janeiro: comparação entre os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para o clima futuro. 2023. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, 2023.

TOWNER, J., FICCHÍ, A., CLOKE, H. L., BAZO, J., COUGHLAN DE PEREZ, E., & STEPHENS, E. M. (2021). **Influence of ENSO and tropical Atlantic climate variability on flood characteristics in the Amazon basin**. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(7), 3875-3895.

TATEBE, HIROAKI, OGURA, T., NITTA, T., KOMURO, Y., OGOCHI, K., TAKEMURA, T., SUDO, K., SEKIGUCHI, M., ABE, M., SAITO, F., CHIKIRA, M., WATANABE, S., MORI, M., HIROTA, N., KAWATANI, Y., MOCHIZUKI, T., YOSHIMURA, K., TAKATA, K., O'ISHI, R., ... KIMOTO, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. **Geoscientific Model Development**, 12(7), 2727–2765. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019>

TEBALDI, C., DEBEIRE, K., EYRING, V., FISCHER, E., FYFE, J., FRIEDLINGSTEIN, P., KNUTTI, R., LOWE, J., O'NEILL, B., SANDERSON, B., VAN VUUREN, D., RIAHI, K., MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z., TOKARSKA, K., HURTT, G., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J., MEEHL, G., MOSS, R., BAUER, S., BOUCHER, O., BROVKIN, V., BYUN, Y., DIX, M., GUALDI, S., GUO, H., JOHN, J., KHARIN, S., KIM, Y., KOSHIRO, T., L., OLIVIÈ, D., PANICKAL, S., QIAO, F., RONG, PORTUGUÊS X., ROSENBLOOM, N., SCHUPFNER, M., SÉFÉRIAN, R., SELLAR, A., SEMMLER, T., SHI, X., SONG, Z., STEGER, C., STOUFFER, R., SWART, N., TACHIIRI, K., TANG, Q., TATEBE, H., VOLDOIRE, A., VOLODIN, E., WYSER, K., XIN, X., YANG, S., YU, Y., E ZIEHN, T. (2020). Projeções de modelos climáticos do Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) do CMIP6. **Dinâmica do Sistema Terrestre**. <https://doi.org/10.5194/ESD-12-253-2021>

TUCCI, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). Secretaria de Fiscalização de Infraestrutura Portuária e Ferroviária. Relatório de Fiscalização. Melhoramentos no Canal de Navegação da Hidrovia do Rio Madeira Na Região Norte 2017 https://www.camara.leg.br/internet/comissao/index/mista/orca/orcamento/OR2018/Fiscobras2017/anexo/SINTETICOS/Sint%C3%A9tico_2017_12.pdf

VILLAMIZAR, E. A. R.; ADENEY, J. M.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. HYDROCHEMICAL CLASSIFICATION OF AMAZONIAN RIVERS: A SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 21, n. 78, p. 211–226, 2020. DOI: 10.14393/RCG217853272. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/53272>. Acesso em: 4 dez. 2024.

VERGASTA, L. A., CORREIA, F. W. S., SATYAMURTY, P., CHOU, S. C., LYRA, A. de A., GOMES, W. de B. (2023). **An assessment of the present hydroclimatic regime of the Madeira River basin using climate and hydrological models**. *Hydrological Sciences Journal*, 68(10), 1338–1357. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2216844>

ZHOU, T. (2020). Prefácio para edição especial sobre experimentos CMIP6: descrições de modelos e conjuntos de dados. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37, 1033 - 1033. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0008-8>.

ZOGAHIB, A. L. N., DE SOUZA SIMAS, D. C., DO NORTE FILHO, A. F., DE OLIVEIRA NORTE, N. N. B., DE SALES, R. A. C., DE LIMA, J. S., DE LEÃO BRAGA, M. A. P. (2024). Mudanças climáticas e seus impactos nas cidades: estudo de caso do fenômeno da seca no Estado do Amazonas, Brasil. *Research, Society and Development*, 13(9), e9913946940-e9913946940.

WU, Y.; MIAO, C.; SUN, Y.; AGHAKOUCHAK, A.; SHEN, C.; FAN, X., 2021. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of Monthly temperature and precipitation. *GeoHealth*, v. 5, (5), e2021GH000390. <https://doi.org/10.1029/2021GH000390>

Zheng, Wei e Kazeem, Olalekan, Climate Change and Rainfall Characteristics: A Five Decade Assessment on Ecosystem in Yellow River Basin, China (Mudança climática e características de precipitação: uma avaliação de cinco décadas sobre o ecossistema na Bacia do Rio Amarelo, China). Disponível em SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4926409>