

**ÍNDICE DE DESCONFORTO TÉRMICO E SUA PROJEÇÃO PARA CENÁRIOS
FUTUROS NO MUNICÍPIO DE TUCURUÍ-PA**

Amanda Sena de **Sá**¹, Carlos Eduardo Aguiar de Souza **Costa**^{2*}, Márcia Evellyn Portilho **Cruz**³, Vanessa Conceição dos **Santos**⁴, Laila Rover **Santana**⁵

¹Graduanda na Universidade Federal do Pará - UFPA

²Doutor em Engenharia Civil e Professor da Universidade Federal do Pará – UFPA

³Graduanda na Universidade Federal do Pará - UFPA

⁴Mestra em Engenharia Civil e Professora da Universidade Federal do Pará - UFPA

⁵Mestra em Engenharia Civil (UFPA); Professora do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará - IFPA

*Autor para correspondência E-mail: cecosta@ufpa.br

Recebido: 10.01. 2024 Aceito: 17.07. 2024

RESUMO: Com as mudanças climáticas acontecendo no planeta, como a elevação da temperatura média da terra, onde a Amazônia é notoriamente uma das regiões mais suscetível a sentir impactos. As condições meteorológicas, como temperatura e umidade do ar, desempenham um papel crucial no desconforto térmico. O índice de desconforto térmico (IDT) quantifica os níveis de estresse que uma pessoa experimenta em face dessas condições adversas. O objetivo deste trabalho foi analisar a variabilidade da temperatura e umidade relativa do ar, calcular os índices de desconforto térmico no município de Tucuruí (PA) e suas projeções para cenários futuros. A partir dos dados observados de temperatura e umidade (1980 a 2022), e dos cenários futuros RCP 4.5 e RCP 8.5 foram analisados a variabilidade das variáveis climatológicas. Na última etapa realizou-se o cálculo do IDT dos dados observados e dos cenários futuros. A partir dos resultados, foi possível observar que as variáveis meteorológicas se correlacionam agindo de maneira inversa, havendo quedas significativas nas taxas de umidade com o passar dos anos. Constatou-se que o município de Tucuruí se apresenta de maneira constante na zona de desconforto leve, e que as variáveis meteorológicas influenciam bastante o IDT, principalmente durante a estiagem do município. No RCP 8.5, apesar de começar na zona de conforto, a partir do meio do século apresentará índices de desconforto leve ao desconforto ao desconforto por aquecimento.

Palavras-chave: Climatologia; Mudanças Climáticas; Temperatura; Umidade; Amazônia.

**THE THERMAL DISCOMFORT INDEX AND ITS PROJECTION FOR FUTURE
SCENARIOS IN THE MUNICIPALITY OF TUCURUÍ – PA**

ABSTRACT: With climate change happening on the planet, such as the rise in the average temperature of the earth, where the Amazon is notoriously one of the regions

most susceptible to feeling impacts. Meteorological conditions, such as air temperature and humidity, play a crucial role in thermal discomfort. The thermal discomfort index (TDI) quantifies the levels of stress that a person experiences in the face of these adverse conditions. The objective of this work was to analyze the variability of temperature and relative humidity, calculate thermal discomfort indices in the municipality of Tucuruí (PA) and its projections for future scenarios. Based on observed temperature and humidity data (1980 to 2022), and future scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5, the variability of climatological variables was analyzed. In the last stage, the IDT of the observed data and future scenarios was calculated. From the results, it was possible to observe that meteorological variables correlate, acting inversely, with significant drops in humidity rates over the years. It was found that the municipality of Tucuruí is constantly in the mild discomfort zone, and that meteorological variables greatly influence the IDT, especially during drought in the municipality. In RCP 8.5, despite starting in the comfort zone, from the middle of the century it will present rates of mild discomfort to discomfort due to heating.

Keywords: Climatology. Climate changes. Temperature. Humidity. Amazon.

ÍNDICE DE MALESTAR TÉRMICO Y SU PROYECCIÓN PARA ESCENARIOS FUTUROS EN EL MUNICIPIO DE TUCURUÍ-PA

RESUMEN: Con los cambios climáticos que ocurren en el planeta, como el aumento de la temperatura promedio de la tierra, la Amazonía es notoriamente una de las regiones más susceptibles a sentir impactos. Las condiciones meteorológicas, como la temperatura y la humedad del aire, desempeñan un papel crucial en el malestar térmico. El índice de malestar térmico (TDI) cuantifica los niveles de estrés que experimenta una persona ante estas condiciones adversas. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad de la temperatura y la humedad relativa, calcular índices de malestar térmico en el municipio de Tucuruí (PA) y sus proyecciones para escenarios futuros. Con base en los datos observados de temperatura y humedad (1980 a 2022), y los escenarios futuros RCP 4.5 y RCP 8.5, se analizó la variabilidad de las variables climatológicas. En la última etapa se calculó el IDT de los datos observados y escenarios futuros. A partir de los resultados se pudo observar que las variables meteorológicas se correlacionan, actuando de manera inversa, con caídas significativas en los índices de humedad a lo largo de los años. Se encontró que el municipio de Tucuruí se encuentra constantemente en la zona de malestar leve, y que las variables meteorológicas influyen mucho en el IDT, especialmente durante la sequía en el municipio. En RCP 8.5, pese a partir de la zona de confort, a partir de mediados de siglo presentará índices de malestar leve a malestar por calefacción.

Palabras clave: Climatología; Cambios climáticos; Temperatura; Humedad; Amazonas.

INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial no século XVIII, é perceptível que o planeta passou por diversas mudanças em sua temperatura média, e que hoje impactam diretamente em pautas socioeconômicas e climáticas, que possuem forte interligação entre si. Segundo Artaxo (2014), o aumento de temperatura vem sendo constatado desde o ano de 1850, com uma crescente de aproximadamente 1 grau Celsius, em média, na escala mundial, e de 1,5 graus no Brasil.

A Organização Mundial de Meteorologia (OMM) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) criou em 1988 o *Intergovernmental Painel on Climate Change* - IPCC. O IPCC é formado por diversas instituições científicas de diferentes países, onde tem o papel de analisar, mensurar as possíveis mudanças no clima e elaborar relatórios técnicos (ARs) que detalham os possíveis impactos, medidas de adaptação e vulnerabilidade do mundo às mudanças climáticas (Costa et al., 2020).

Até agora, têm-se cinco relatórios: AR1 (1990), AR2 (1995), AR3 (2001), AR4 (2007), AR5 (2014) e o AR6 (2023) que estão em fase de conclusão. Os resultados são encaminhados a formuladores de políticas públicas, a fim de obter um assentimento governamental. Assim, é coerente dizer que o IPCC é um órgão híbrido pois atua em cima dos deveres científicos e políticos.

O IPCC, em seu quinto relatório (AR5), destaca os cenários futuros provenientes das mudanças do clima que ocorre no nosso planeta, onde chama-se de RCPs – *Representative Concentration Pathways*. Conforme Costa et al. (2021) os RCPs são simulações do grau de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), como também emissão de poluente na atmosfera durante o século XXI. Existe o RCP 2.6, baseado em um contexto de mitigação extremamente severo; RCP 4.5 e RCP 6 com um cenário otimista em relação as emissões; e o RCP 8.5 que é intitulado como o pior cenário, em hipótese, com as maiores emissões e efeitos sobre o clima.

O Brasil está mais suscetível a sofrer as consequências das mudanças climáticas, onde regiões como Amazônia e Nordeste brasileiro podem ser as mais afetadas (Nobre et al., 2016). A Amazônia possui um destaque maior por possuir características climáticas como temperatura, precipitação pluviométrica e umidade relativa do ar superiores as outras regiões do país (Monteiro et al., 2016).

Em conformidade com Ribeiro e Navas (2018), as atividades antrópicas poluidoras são as grandes responsáveis pelo aquecimento global causado através do

efeito estufa, provocando o aumento da temperatura no planeta. Já a umidade relativa do ar (UR) possui uma variação inversa com a temperatura do ar, em períodos mais quentes é frequente que a UR tenha uma diminuição.

A umidade é um índice para indicar a quantidade de vapor d'água presente na atmosfera (Peeters et al., 2020). Este fenômeno está vinculado ao processo de evaporação e transpiração do ciclo hidrológico, ambos os processos contribuem significativamente para a umidade atmosférica, desempenhando um papel crucial no equilíbrio do ciclo hidrológico.

Os índices de temperatura e UR estão diretamente ligados ao conforto térmico. Arsad et al. (2023) afirmam que o conforto térmico está ligado a satisfação que uma pessoa sente em um ambiente resultante das trocas de calor do corpo e ambiente. De Ren et al. (2023) citam que o desconforto térmico interfere na qualidade de vida em sociedade, visto que as reações diante ao desconforto envolvem saúde pública, rentabilidade do trabalho, consumo de energia e sociabilidade.

É extremamente importante compreender como as variáveis meteorológicas podem estar associadas ao desconforto térmico humano, e com o intuito de avaliar isso, existem diversos modelos matemáticos que contabilizam o nível de estresse do indivíduo por meio de índices que levam em consideração estas variáveis (Hartabela et al., 2021).

Sendo assim, o objetivo desta pesquisa foi analisar a variabilidade da temperatura e umidade relativa do ar, e realizar uma análise do índice de desconforto térmico (IDT) do município de Tucuruí (PA) durante uma série histórica e realizar suas projeções para cenários futuros. A cidade de Tucuruí e sua população passaram por diversas mudanças ambientais nas últimas quatro décadas, analisar o IDT e disponibilizar estes dados será uma contribuição, a fim de que os próximos passos do planejamento urbano levem em consideração estas variáveis.

2 METODOLOGIA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Tucuruí é um município localizado ao sudeste do Estado do Pará, dentro do

bioma amazônico (Figura 1), onde se destaca por estar na Zona Equatorial e apresentar clima quente e úmido (Ferreira et al., 2002). Segundo Fisch, Januário e Senna (1990), Tucuruí se caracteriza no regime Tropical, onde seus períodos de chuvas e secas são bem estabelecidos, dezembro a março consiste no período de chuva e julho a setembro de seca e a temperatura média é de 25 °C no município e se mantém constante, não possuindo altas variações nos períodos de chuvas e secas.

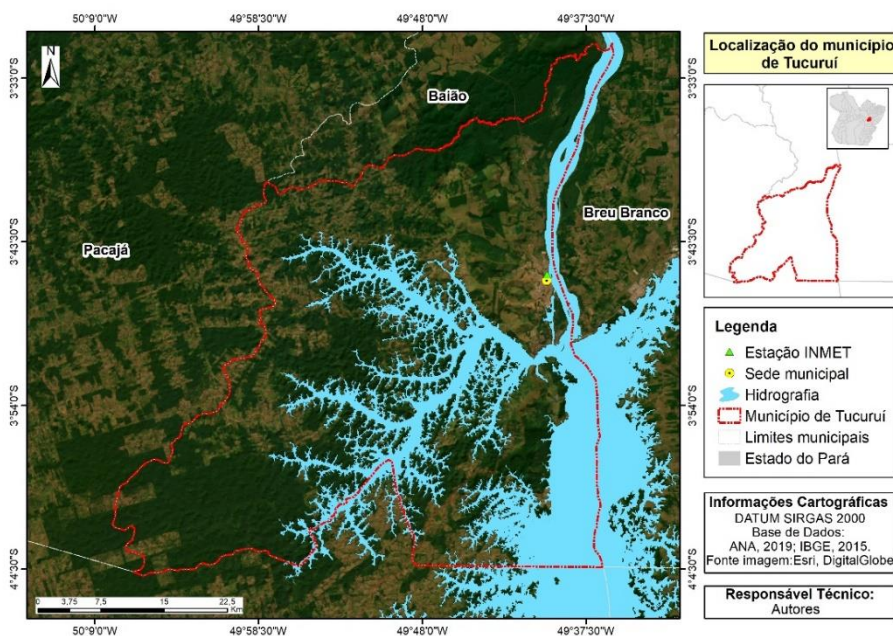


Figura 1. Localização do município de Tucuruí.
Fonte: Autores, 2023.

O município pertence a bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia, onde se encontra uma das maiores usinas hidroelétricas do Brasil, a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHT). O PIB per capita do município é de R\$ 39.674,02 (IBGE, 2023) com uma população de 91.306 habitantes, a densidade demográfica é de 43,81 hab/km² (IBGE, 2023). Com a construção da UHT ocorreu uma grande mudança no espaço físico do município, como a formação do lago artificial de Tucuruí, sendo o segundo maior reservatório do país (Oliveira, 2020). O lago artificial abrange mais seis municípios: Novo Repartimento, Breu Branco, Goianésia do Pará, Jacundá e Nova Ipixuna (Farias et al., 2021).

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) é de 0,666 (IBGE, 2010). O município é avaliado com médio desenvolvimento humano (Castro et al., 2010). A UHT foi a grande responsável pelas mudanças geográficas e econômicas de Tucuruí, resultando na construção da BR-422 e do aeroporto da cidade. Segundo Farias

et al. (2021), mais da metade do PIB da cidade é proveniente da UHT, onde atualmente, o setor econômico do município se destaca através das atividades comerciais e de serviços, com uma vasta gama de lojas, hotéis, restaurantes, consultórios, bares, oficinas, entre outros serviços terceirizados.

2.2 DADOS CLIMATOLÓGICOS

2.2.1 Dados observados

Os dados observados foram obtidos através da estação meteorológica (código 82361), localizada no município de Tucuruí (Figura 1), disponível na plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Os dados mensais são referentes aos anos 1980-2022 contendo dados mensais das variáveis de temperatura (média, mínima e máxima) e umidade relativa do ar. Os dados trabalhados não apresentaram falhas, resultando em uma série de 30 anos.

2.2.2 Dados futuros - General Circulation Models (GCMs)

Para calcular o Índice de Desconforto Térmico no futuro, foram utilizados os dados mensais das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar. A obtenção destes dados se fez para a mesma localização geográfica da estação utilizada para os dados observados.

Os dados futuros obtidos de temperatura e umidade relativa do ar, já simulados através de modelos climáticos robustos. Essas simulações envolvem modelos computacionais complexos chamados de General Circulation Models (GCMs), que consideram uma variedade de fatores, como padrões atmosféricos, movimentos oceânicos e concentração de gases de efeito estufa. Esses dados são cruciais para entendermos e planejarmos para os desafios das mudanças climáticas.

As simulações escolhidas foram do GCM (*General Circulation Model*) de origem japonesa MIROC5 (*Model for Interdisciplinary Research on Climate Version*). GCMs são modelos de projeção climáticas, com a finalidade de caracterizar os principais processos do Sistema Terrestre (INPE, 2023). O MIROC5 foi escolhido por conta da sua boa eficiência em simular variáveis climatológicas em regiões equatoriais (Costa et al., 2020). Watanabe et al. (2010) mostram que este GCM possui resultados dos cenários mais concretos para América do Sul através da sua capacidade de simulação do

fenômeno ENOS (El Niño Oscilação-Sul), contribuindo assim para os resultados satisfatórios na região amazônica.

O MIROC5 possui uma resolução de $1,4^{\circ} \times 1,4^{\circ}$ (155,55 km x 155,55 km), e o *ProjEta* disponibiliza estes dados com uma resolução mais refinada, de 20 km x 20 km. A plataforma consiste no método de viabilização dos dados de simulações climáticas regionalizadas das projeções climáticas para o Brasil executados pelo modelo regional *Eta* (Lima, 2019).

Neste trabalho foram utilizados os dados referentes aos cenários do IPCC RCP 4.5 e RCP 8.5, desta forma, foram realizadas análises de um cenário “otimista” e outro “pessimista”. A escolha destes cenários do quinto relatório se deu pela acessibilidade à plataforma brasileira “*ProjEta-colab*” (Projeções de mudanças do clima para a América do Sul regionalizadas pelo modelo *Eta*) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, valorizando assim as nossas pesquisas nacionais, e disponibilidade de dados para os objetivos do trabalho. Utilizou-se a mesma coordenada geográfica que se encontra a estação meteorológica do INMET.

A página *web* do *ProjEta* encontra-se instável, à vista disso, foi disponibilizado através do INPE o acesso (liberação do link de acesso) ao *ProjEta-colab*. Assim, tornando-se possível a aquisição dos dados mensais das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, referente as projeções futuras dos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 para os anos de 2023-2099, ressaltando que o ano de 2023 foi considerado futuro, pois esta pesquisa se iniciou no primeiro semestre do mesmo. A partir da Figura 2 verifica-se a interface da plataforma.

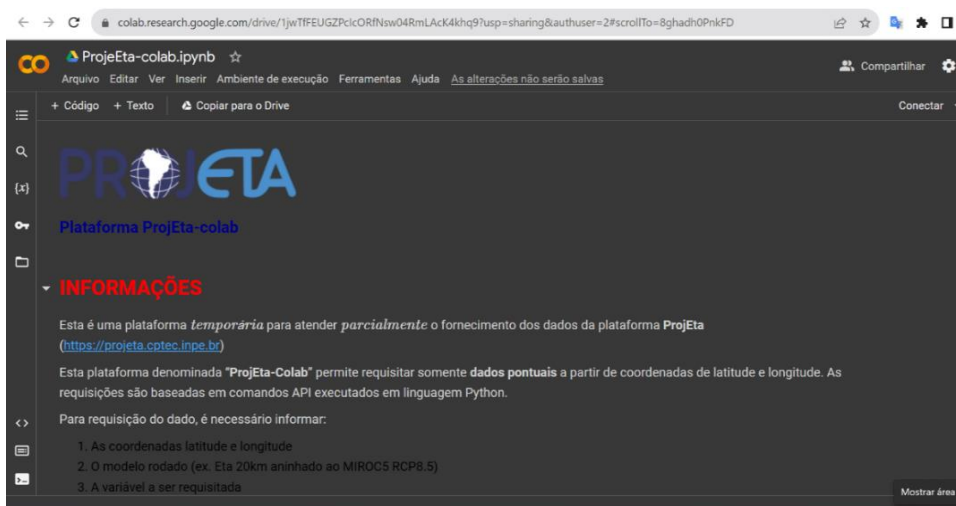


Figura 2. Estrutura Plataforma *ProjEta-colab*.

Fonte: Autores, 2023.

2.3 ESTIMATIVA E CLASSIFICAÇÃO DO DESCONFORTO TÉRMICO

Os Índices de Desconforto Térmico (IDT) analisados foram obtidos através da equação IDT (Equação 1), método de Thom (1959), em conformidade com Pedreira Junior et al. (2018). Utilizando somente duas variáveis: temperatura e umidade relativa do ar.

$$ID = T - (0,55 - 0,0055 * UR) * (T - 14,5) \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que T se refere a temperatura média do ar (°C) e UR retrata a umidade relativa do ar (%).

Após realizado as estimativas do IDT é necessário realizar a classificação do grau de desconforto. Souza e Nery (2012) destacam que a classificação de Thom (1959) apesar de permitir a classificação do desconforto em diferentes cidades, é incoerente quanto à classificação em ambientes tropicais, com elevadas temperaturas e umidade. Os autores citam ainda que os intervalos e a classificação do IDT de Terjung (1996) (Tabela 1) é mais condizente para regiões onde a faixa de conforto é de 20°C a 24°C. Esses fatores influenciaram para utilizar esta classificação do IDT, levando em conta as características climáticas de Tucuruí.

Tabela 1. Classificação do Índice de Desconforto utilizado no trabalho

Intervalo do ID (°C)	Níveis de Conforto Térmico
> 30	Stress térmico
27°C – 30°C	Desconforto por aquecimento
24°C – 27°C	Leve desconforto
20°C – 24°C	Zona de conforto ou neutralidade térmica
18°C – 20°C	Leve desconforto
15°C – 18°C	Desconforto por resfriamento
12° - 15°C	Resfriamento elevado

Fonte: Adaptado de Terjung (1966)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 ANÁLISE DOS DADOS CLIMATOLÓGICOS

3.1.1 Dados Observados

A partir dos dados observados foi possível gerar o gráfico para a temperatura. Na Figura 3 é possível notar a variabilidade da temperatura máxima (TP MAX), temperatura média (TP MED) e temperatura mínima (TP MIN) em Tucuruí nos últimos 42 anos (1980 a 2022).

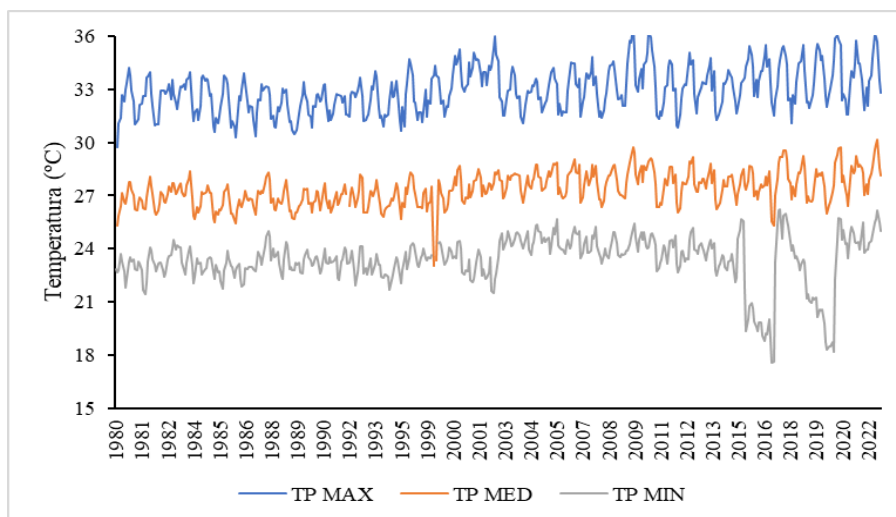


Figura 3. Variabilidade da temperatura em Tucuruí no período de 1980 a 2022
Fonte: Autores, 2023.

Analisando a Figura 3, o período de 2015-2020 se destaca por marcar temperaturas mínimas abaixo de 20 °C, essas temperaturas podem estar associadas ao evento La Niña (fenômeno caracterizado pelo aumento da intensidade de chuvas na Amazônia). As temperaturas máximas durante alguns períodos (2001-2003, 2009-2010 e 2018-2022) apresentaram uma sequência de altas temperaturas acima de 35 °C em vários momentos durante o período. A maior temperatura registrada aconteceu em outubro de 2009, neste mesmo período comparando com eventos climáticos, estava ocorrendo o fenômeno El Niño (fenômeno que se caracteriza pela estiagem de chuva na Amazônia).

A temperatura média atingiu valores mínimo e máximo de 23 °C e 30 °C, sendo a mínima registrada em janeiro de 1999 e a máxima em outubro de 2022. Fisch, Januário e Senna (1990) destacam que a temperatura em toda a região amazônica se destaca

por se manter em uma isoterma durante todo ano, com temperatura média de 25 °C. Em Tucuruí a temperatura média registrada para os dados observados foi de 27 °C havendo assim uma elevação de 2 °C.

Os autores também analisaram parâmetros meteorológicos (médias mensais) de uma estação climática em Tucuruí durante o período dezembro de 1982 a dezembro de 1986, onde destacaram que apesar das características isotérmicas, há uma sazonalidade nas temperaturas entre os meses de inverno (período de chuva) e os meses de verão (estiagem de chuva).

Fish, Marengo e Nobre (1996) citam que os altos valores de radiação solar na Amazônia, interferem na variabilidade de temperatura da região neste período de anos, causando pequenas variações durante o ano. Os autores complementam que a média sazonal térmica é de 1-2 °C, com variações médias de temperatura de 24 e 26 °C, onde cidades como Belém apresenta suas temperaturas mínimas em março e Manaus possui suas temperaturas extremas em setembro.

Ribeiro et al. (2014) destacam que os meses mais quentes em Tucuruí são de setembro a novembro, onde chamam de primavera, sendo esses os meses de estiagem no município, e os meses mais chuvosos, que chamam de outono, ocorre de janeiro a abril, durante esses meses ocorre a diminuição de temperaturas no município.

A Figura 4 são apresentados os valores da variação histórica da UR durante o período de 1980 a 2022.

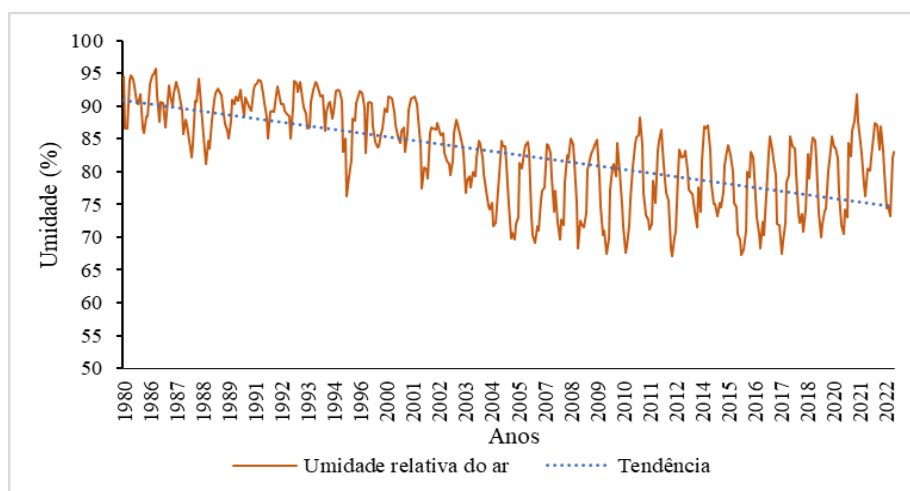


Figura 4. Variabilidade da Umidade Relativa do Ar 1980-2022.
Fonte: Autores, 2023.

Analisando a variabilidade da Umidade Relativa do Ar na Figura 4, nota-se que com o passar dos anos acontece um declínio nas taxas de UR.

Em abril de 1986 foi registrado a maior taxa de UR sendo este valor de 95,72%, e em setembro de 2012 a menor com registro de 67,17%. A amplitude entre os registros de máxima e mínima foi de 28,55. A Figura 5 exhibe as médias mensais das variáveis climatológicas da série histórica.

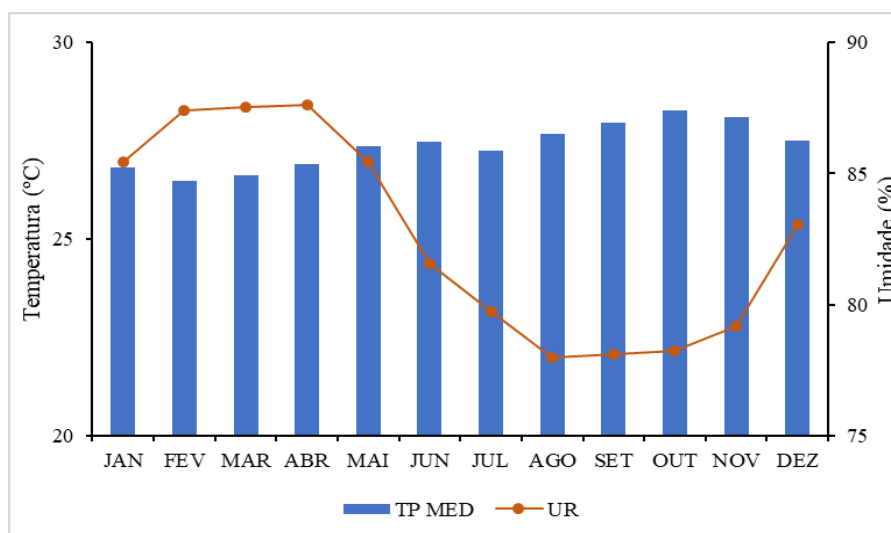


Figura 5. Média mensal de temperatura e umidade relativa do ar 1988-2022.
Fonte: Autores, 2023.

Alves (2016) expõe sobre a dependência da umidade relativa do ar em relação à temperatura. Atentando-se a Figura 5 as variáveis de Temperatura e Umidade se comportam de maneira inversa, ou seja, quando um sobe o outro tende a decair. As alterações das taxas de umidade relativa do ar não estão necessariamente atreladas na variação de concentração de vapor d'água, mas pode estar atrelado em específico as alterações de temperatura (Pedreira Junior et al., 2018).

Ao atentar-se na Figura 5 nota-se que nos meses de janeiro a abril registra-se os menores índices de temperatura, os respectivos meses marcam as maiores taxas de umidade relativa do ar. Os meses de dezembro a abril apresenta-se temperaturas baixas e maiores taxas de UR, essa variabilidade se destaca por ser os meses chuvosos da região. O mesmo acontece no período de estiagem, setembro a novembro, onde apresenta-se maiores temperaturas e taxas mínimas de UR. Conforme destacado por Fisch, Januário e Senna (1990), as características climáticas da região seguem um padrão bem definido. O período de chuvas abrange os meses de dezembro a março, enquanto a estação seca ocorre de julho a setembro.

Os índices de umidade agem de maneira inversa com a temperatura, quando a temperatura sobe a umidade tende a cair (Pedreira Junior et al., 2018) os meses de

setembro a outubro registraram maiores temperaturas e baixas umidade relativa do ar. Analisando a variabilidade da umidade percebe-se então que os meses de maiores registros de umidades, são os meses com menores índices de temperatura.

Repara-se que na variabilidade mensal da UR que os meses mais úmidos são fevereiro a abril, e de julho a novembro há uma queda gradual nos índices de umidade. O valor da UR volta a subir a partir do mês de dezembro. Os meses de julho e dezembro, detalha-se que seja uma forma de zona mista ou de transição entre os períodos mais úmidos e mais secos.

3.1.2 Dados Futuros

3.1.2.1 Cenário RCP 4.5

Examinando a Figura 6 constata-se mudanças nas variações de temperatura durante o cenário RCP 4.5. Neste cenário, a temperatura mínima seria de 22 °C em março de 2023, em contrapartida analisando a série histórica do INMET, em março foi registrado uma temperatura mínima de 24 °C. A temperatura máxima registrada será de 32 °C em novembro de 2084.

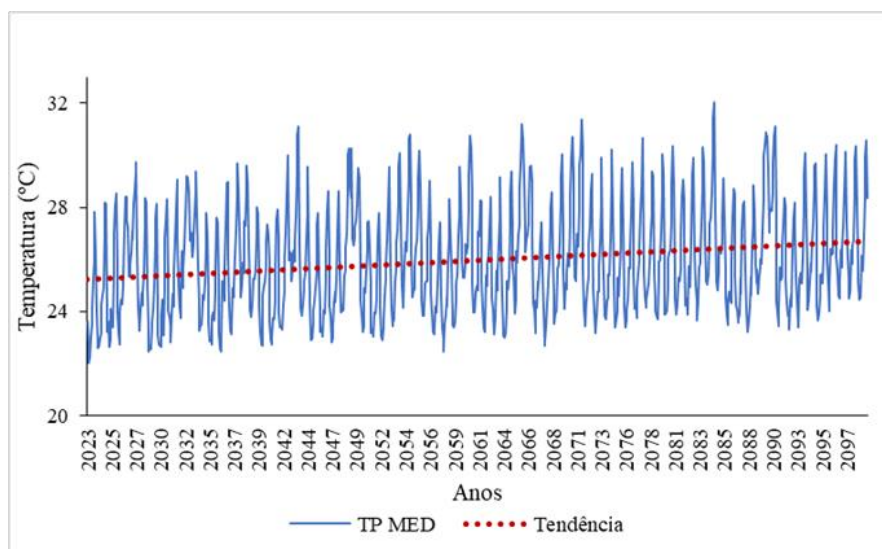


Figura 6. Temperatura média RCP 4.5.

Fonte: Autores, 2023.

Com uma amplitude de 10 °C, entende-se que os dados de temperaturas estarão menos dispersos e concentrados em torno da média de 26 °C. Em comparação com os dados observados, a temperatura média máxima irá obter um aumento significativo de

2 °C. Apesar da temperatura média ter apresentado uma queda de 1 °C, haverá maiores concentrações de temperatura acima de 26 °C no cenário RCP 4.5.

É notório que irá ocorrer aumento gradativo das temperaturas acima dos 30 °C, com a inclinação da reta de tendência instiga-se que há uma disposição na crescente de temperatura. De forma contrária, para a umidade relativa do ar no cenário RCP 4.5 constata-se uma variabilidade decrescente na reta de tendência da umidade relativa do ar. Os dados simulados podem ser visualizados na Figura 7.

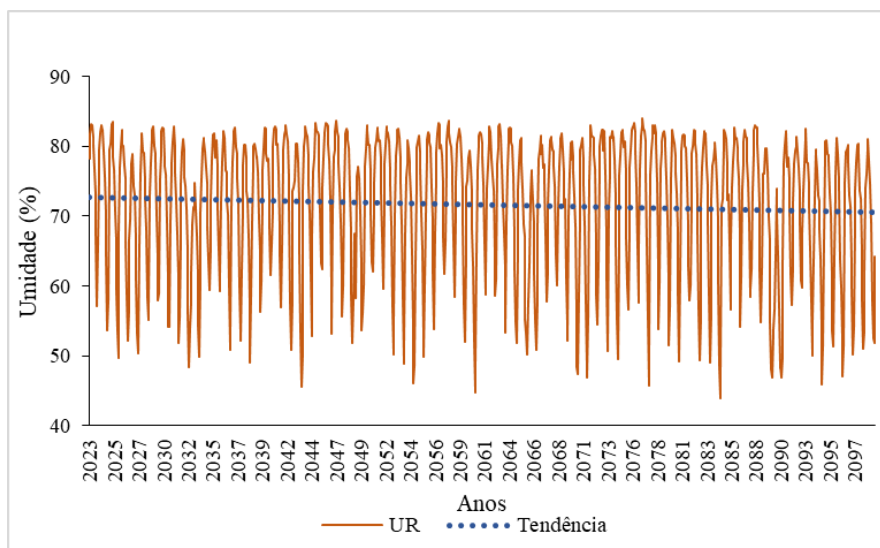


Figura 7. Umidade relativa do ar do cenário RCP 4.5.
Fonte: Autores, 2023.

Verificando a Figura 7 é explícito que as alterações nas suas oscilações, ou seja, as taxas de umidade relativa de ar apresentaram índices baixos gradualmente. O menor índice de 43% acontecerá em outubro de 2084 e o maior de 84% em março de 2077. Em comparação com a média da umidade relativa do ar dos dados observados, o cenário RCP 4.5 apresentará um aumento de 9%. Com isso é possível perceber que a umidade relativa do ar manteve uma variação nos seus valores de forma decrescente, diminuindo no decorrer do tempo.

No ano de 2090 as variações apresentarão valores de 46% a 73%, alcançando níveis bem abaixo da média, características de um tempo relativamente seco. O período seco se define quando há elevação de temperaturas e a umidade relativa do ar está em declínio (Casagrande et al., 2021).

O RCP 4.5 é um cenário que se aproxima dos dados observados. A Figura 8 apresenta a variabilidade mensal dessas variáveis, onde é perceptível as semelhanças

da variabilidade desde cenário com os dados observados.

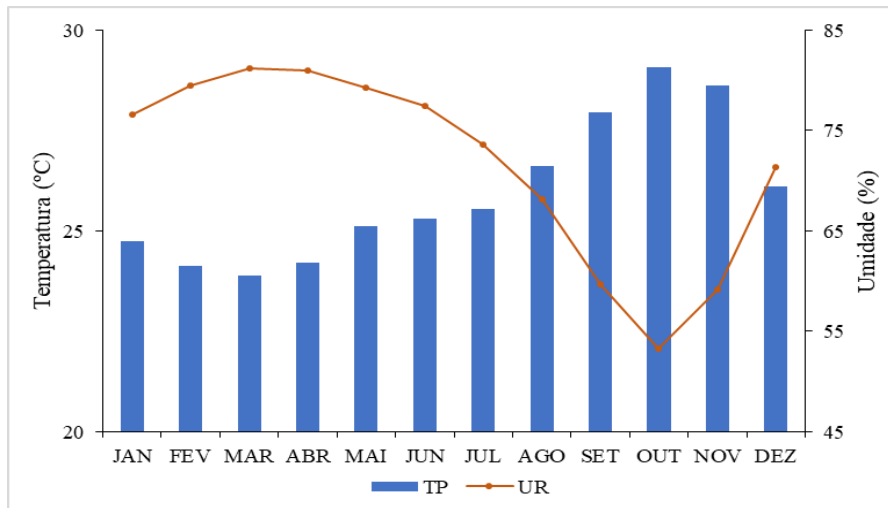


Figura 8. Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar RCP 4.5.
Fonte: Autores, 2023.

O menor índice de umidade ocorrerá no mês com maior pico de temperatura, outubro. Neste cenário, os meses de janeiro a abril irão apresentar índices de temperatura relativamente baixo em relação aos dados observados, e a umidade relativa do ar apresentará mudanças nos seus parâmetros. A umidade se manterá em uma instabilidade, destacando que as suas taxas estão se comportando de maneira decrescente com os passar dos anos, independente da temperatura (Ferreira et al., 2016).

De setembro a outubro são os meses que apresentarão aumento significativo de temperatura, considerando-se que as maiores mudanças aconteceram na intensificação do grau de temperatura nos períodos que já são destacados como os mais quentes. No entanto, a umidade relativa do ar registrará valores decrescentes em todos os meses do ano, ou seja, havendo assim as características de um tempo mais seco. A máxima de temperatura nesse período será registrada em outubro de 2084 marcando 32 °C, onde no mesmo período será registrado a menor taxa de umidade relativa do ar marcando 44%.

Durante os meses de setembro a novembro, habitualmente marcados por temperaturas mais elevadas, prevê-se um incremento térmico acompanhado por reduções nos níveis de umidade relativa. Isso resultará em uma intensificação do período quente nesse intervalo de tempo.

3.1.2.2 Dados Futuros: Cenário RCP 8.5

Em relação ao cenário pessimista é constatado que a temperatura apresentará elevações significativas com os passar dos anos. A Figura 9 demonstra a variabilidade dessa variável para esse cenário.

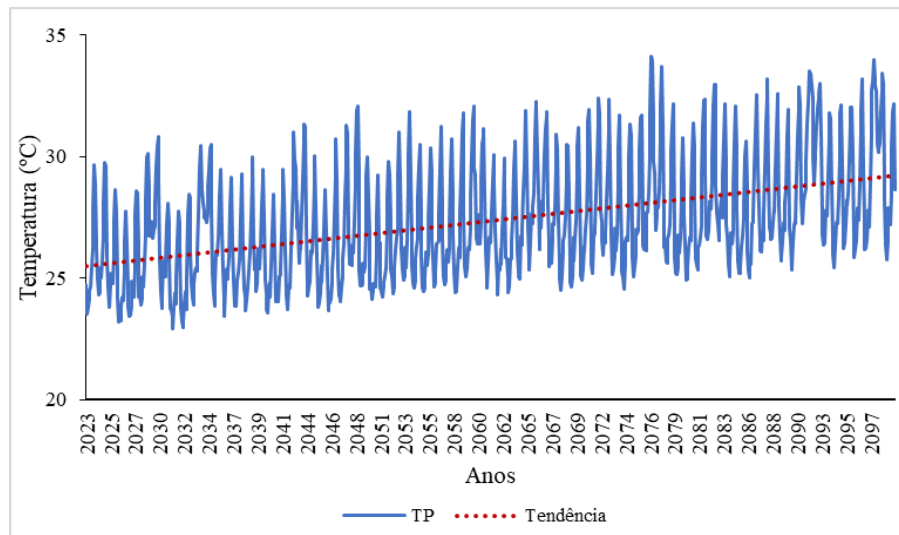


Figura 9. Temperatura RCP 8.5.
Fonte: Autores, 2023.

Através da reta de tendência fica exposta que a variação da variável de temperatura continuará destacando valores relevantes. A temperatura mínima registrada no período será de 23 °C em abril de 2031. Em relação aos dados observados e ao RCP 4.5 a temperatura mínima se manterá em um mesmo patamar de 22 a 23 °C, constata-se que em ambas as situações tendem a acontecer durante os meses que se distinguem pelos menores índices de temperatura.

Entretanto, salienta-se que a temperatura máxima atingiu 34 °C em outubro de 2076, um acréscimo gradativo em comparação com as situações anteriores. Se constata ainda, maiores variações de temperatura em relação as temperaturas máximas, ou seja, os períodos mais quentes sofrerão mais mudanças. Com o passar dos anos a temperatura apresentará elevações consideráveis, com maiores frequência de temperaturas acima dos 30 °C. Ao marcar uma temperatura média de 27 °C, identifica-se a semelhança dos índices durante a série de dados observados. A Figura 10 a seguir exhibe a variabilidade da umidade relativa do ar para o cenário RCP 8.5.

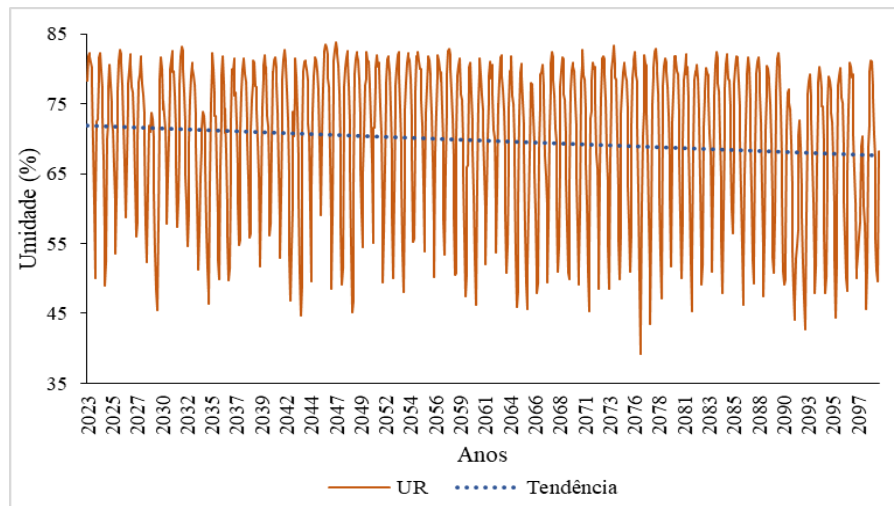


Figura 10. Umidade relativa do ar RCP 8.5.
Fonte: Autores, 2023.

A UR no cenário RCP 8.5 apresentará um comportamento de queda nos seus índices, comparados aos dados observados, marcando máxima 84% em março de 2047 e mínima de 39% em outubro de 2076. É notório o aumento gradual de UR com taxas de 40%, esses serão os menores índices registrados entre as três ocasiões analisadas.

A UR exibirá uma média de 70%, isso significa que a diferença da média dos dados observados com o RCP 8.5 é de 12%. A amplitude entre a umidade máxima e mínima irá ser de 45%. A Figura 11 exibe a variabilidade mensal das variáveis durante o cenário RCP 8.5, onde é possível atentar a variabilidade das variáveis climatológicas mensalmente.

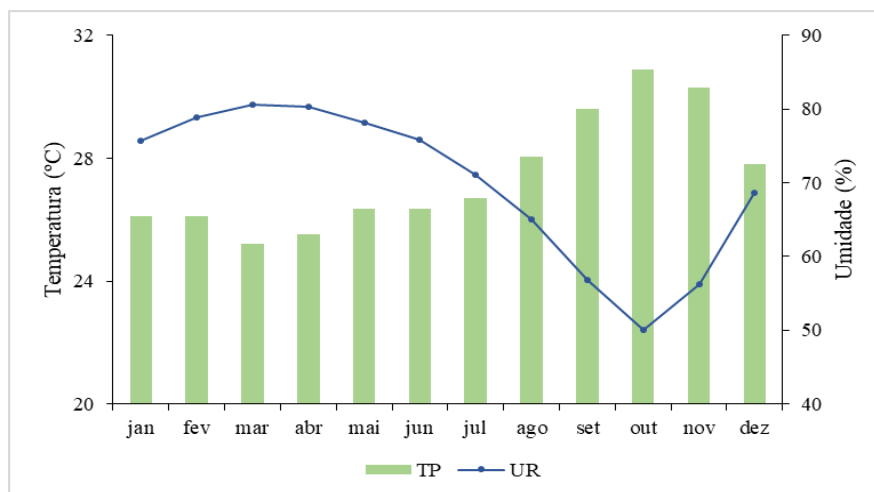


Figura 11. Médias mensais de temperatura e umidade relativa do ar RCP 8.5.
Fonte: Autores, 2023.

Em comparação ao RCP 4.5 e aos dados observados de 1980 a 2022, o RCP 8.5 alcançará aumento de temperatura a partir do mês de agosto que se perdurará até novembro. Por outro lado, a umidade relativa do ar terá suas taxas sempre menores em comparação ao RCP 4.5 e aos dados observados, onde apresentará suas menores taxas de umidade nos meses de agosto a dezembro. É nítido mudanças reais nos índices de temperatura e umidade, sendo a umidade a variável que mais apresentará modificações.

Neste cenário, prevê-se uma extensão do período de estiagem, caracterizado por temperaturas crescentes e níveis de umidade relativa em constante declínio. Este intervalo corresponde à estação de seca do município, indicando alterações significativas nas condições climáticas locais. Entender o alterabilidade dessas variáveis será essencial para avaliar o IDT.

3.2 ÍNDICE DE DESCONFORTO TERMICO (IDT)

3.2.1 IDT Observado

A Figura 12 destaca o IDT dos dados observados, onde obedece a classificação optada nesse trabalho, a classificação de Terjung (1966). As cores presentes na Figura 12 representam os níveis de desconforto térmico: Azul (Zona de conforto); Amarelo (Leve desconforto); Laranja (Desconforto por aquecimento).

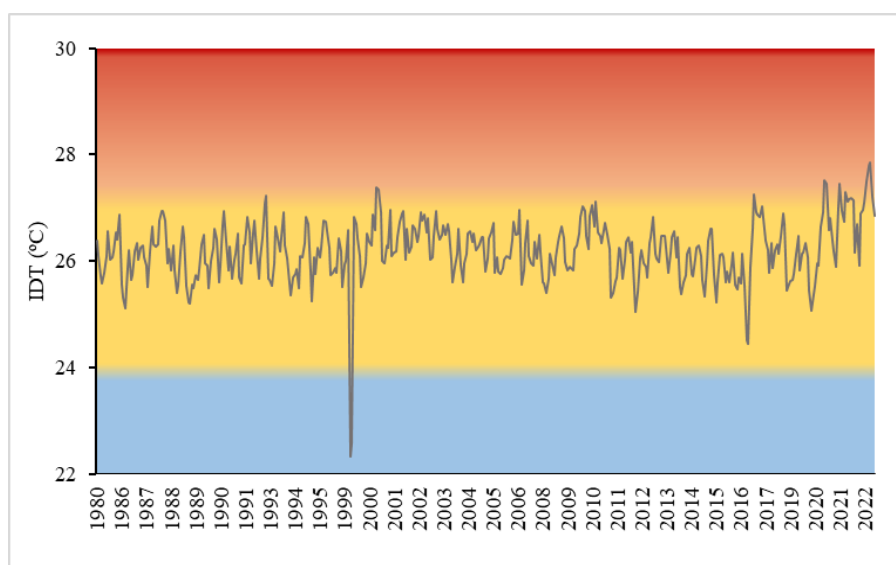


Figura 12. IDT dados observados 1980-2022.

Fonte: Autores, 2023.

O IDT apresentado na Figura 12 detalha que o município esteve durante na maior parte do tempo na classificação de leve desconforto térmico. Registrando somente um único pico de 22 °C na zona de conforto térmico em julho de 1999, mês que alcançou a temperatura média mínima de 23 °C. Entre os anos de 2020 e 2022 surgem picos pontuais no nível de desconforto por aquecimento, marcando IDT de 27 °C e 28 °C.

As altas temperaturas e as elevadas taxas de umidade, são associados ao que difere qualidade térmica do ambiente e a sensação de desconforto térmico (Buonocore et al., 2018). Considerando a Figura 12 e analisando o pico de desconforto por aquecimento de outubro de 2022, nota-se que foi um mês cujo índice de temperatura de 30 °C e a taxa de umidade de 73% estavam acima e abaixo respectivamente da média histórica. Por outro lado, o único registro de conforto térmico ocorreu em um mês, cuja temperatura de 23 °C e a umidade de 84 % estavam abaixo e acima da média das variáveis.

O IDT máximo registrado aconteceu em outubro, este mês registrou 30 °C, a maior temperatura média da série histórica, e uma taxa de UR de 72% (abaixo da média histórica). O desconforto está diretamente ligado as variáveis de temperatura e UR, exercendo influência sobre o IDT registrado. Em contrapartida, o IDT mínimo registrado ocorreu em 1999, um ano em que prevaleceu a ocorrência do fenômeno La Niña.

A média do IDT para os dados observados foi de 26 °C, ressaltando assim que a maioria dos dados de IDT se aproximam da média não havendo tanta variabilidade, a diferença do maior índice de desconforto para o menor resultou em uma amplitude de 6 °C. Desta forma, se compreende a variabilidade da série histórica no nível de desconforto térmico de Terjung (1966) (Tabela1).

Manavvi e Rajasekar (2022) relatam, que a sensação de conforto pode modalizar de pessoa para pessoa, cada ser humano reage de uma forma em exposição ao tempo e clima. Ou seja, a sensação de desconforto pode ser maior ou menor em relação ao IDT, visto que é uma sensação pessoal do ser humano. Por ser uma sensação de bem-estar, a combinação da temperatura, umidade relativa, velocidade do ar, assim como as vestimentas das pessoas, são pontos cruciais para essa determinar a sensação (Amaripadath et al., 2024).

3.2.2 IDT para os Cenários Futuros

O IDT futuro foi calculado através das medias de temperaturas dos cenários RCP

4.5 e RCP 8.5. As cores presentes na Figura 13 e 14, representam a mesma classificação de IDT que foi utilizado em IDT dos dados observados.

A Figura 13 apresenta os IDT para o cenário otimista RCP 4.5, neste cenário o IDT apresentará uma variabilidade contrária aos dados observados, como os picos constantes do IDT em zonas de conforto.

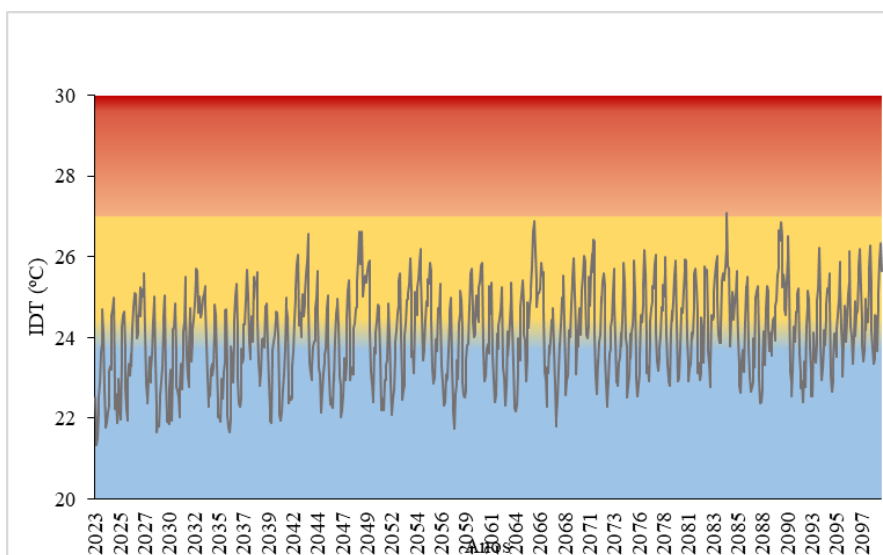


Figura 13. IDT para o cenário RCP 4.5.
Fonte: Autores, 2023.

Através da Figura 13 percebe-se de imediato a diferença em relação aos dados observados. Diferentemente dos dados observados nota-se que durante o cenário RCP 4.5 haverá mais IDT no nível de conforto térmico, os índices se comportam variando entre zona de conforto e leve desconforto. Esse comportamento poderá estar associado a variabilidade das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar neste período, por ser um cenário otimista foi constatado que as mudanças ocorrerão em mais evidência nas taxas de umidade, a temperatura se comportará de maneira simultânea com as dos dados observados.

Em um estudo realizado sobre a sensação térmica em climas quentes e úmidos sobre os efeitos da umidade, Yan et al. (2020) notaram que as mudanças da umidade não surtiram grande efeitos nas pessoas diante das incertezas climáticas, porém, os autores citaram que isso pode estar relacionado ao fato de as pessoas estarem aclimatado com quanto as altas taxas de umidade na região. Contudo, ainda destacam a importância de pesquisas para afirmar tal possibilidade.

A média de temperatura e umidade nesse cenário serão de 26 °C e 71%. Agindo

de maneira inversa com a temperatura essa variável é capaz de acentuar as situações de desconforto. A média do IDT neste cenário irá marcar 24 °C, e atingirá seu índice máximo de 27 °C em novembro de 2084 e seu IDT mínimo registrará 21 °C em março de 2023. Os índices de desconforto durante esse cenário apresentarão baixa variabilidade dos dados em relação à média.

A Figura 14 demonstra o IDT para o cenário RCP 8.5, neste cenário nota-se uma alterabilidade distinta em relação aos dados observados e ao RCP 4.5.

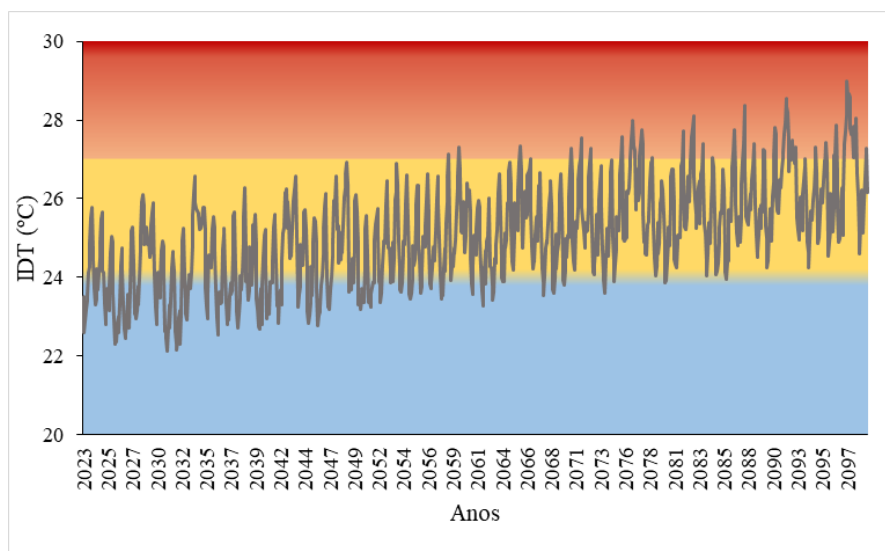


Figura 14. IDT para o cenário RCP 8.5.
Fonte: Autores, 2023.

O cenário RCP 8.5 é o cenário que mais apresentará variâncias nas temperaturas e nas taxas de umidade. A média de IDT atingirá 25 °C, com mínimas e máximas de 22 °C em abril de 2031 e 28 °C em dezembro de 2097. Apesar de atingir um índice médio de desconforto menor comparado aos dados observados, a inconstância do IDT durante os anos deste cenário chamará atenção.

Com temperaturas elevadas e taxas de umidades baixas, o IDT tende a ser maior, causando maior desconforto com um clima relativamente quente e seco. Situação que será destacada é a crescente no IDT, se analisa que a mesma nos primeiros anos tende a está em uma zona de conforto e de leve desconforto, no entanto ao final deste período adentrará na taxa de desconforto térmico por aquecimento, diferindo do cenário RCP 4.5. Costa et al. (2021) comentam em seu trabalho que o cenário RCP 8.5 pode já está ocorrendo, o que é preocupante, pois a partir de 2075 o município de Tucuruí entrará em uma situação crítica.

Barbosa et al. (2015) ao estudarem os modos da umidade relativa do ar em Belém (PA), Manaus (AM) e a região da Flora de Cauxianã (PA), sendo as duas primeiras meio urbano e a terceira ambiente de floresta, notaram que os meios que possuem maiores cobertura vegetal apresentam altos índices de umidade mesmo em período mais secos, reforçando ainda mais a sensação de conforto.

Vale salientar que Tucuruí passou por grandes mudanças territoriais e no meio geológico nas décadas de 80 a 90 com a construção da Usina Hidrelétrica de Tucuruí - UHE, é provável que com o passar dos anos e com as mudanças climáticas recorrentes, haverá mais influência nas sensações térmicas futuras, visto que as variáveis de temperatura e umidade se mantem em mudanças constante.

Os IDT de desconforto por aquecimento serão registrados com maiores frequência no período de estiagem (verão) de Tucuruí, agosto a novembro, período esse em que há presença de altas temperaturas e baixas umidades. Pedreira Junior et al. (2018) ao realizarem uma pesquisa de índice de desconforto térmico em um município do Amazonas, destacaram-se que os maiores índices de desconforto acontecem quando o Hemisfério Sul recebe mais energia solar, neste caso período de verão.

4 CONCLUSÃO

O cenário apresentará variabilidade semelhante aos dados observados. No entanto, se destaca que nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 haverá uma extensão do período quente, setembro a novembro, onde as taxas de temperatura apresentará elevações e a UR queda constante se caracterizando em um clima quente e seco.

As medias de temperatura e umidade são de 27 °C e 83%, onde setembro a novembro se caracterizam como os meses mais secos. A variabilidade de temperatura e umidade influenciam bastante o IDT. A média do IDT de 26 °C destaca que Tucuruí se mantém em zonas de leve desconforto, onde a partir de 2020 apresentou-se IDT na zona de desconforto por aquecimento.

A projeção do IDT no cenário RCP 8.5 indica uma média de 25 °C, caracterizando uma zona de leve desconforto. Nos primeiros 35 anos, a série oscila entre conforto e leve desconforto. Contudo, a partir de 2059, espera-se o surgimento de picos de desconforto por aquecimento. A partir de 2070, prevê-se a ocorrência de picos

mais intensos na zona de desconforto por aquecimento, aproximando-se da zona de estresse térmico até o final do século.

No município de Tucuruí é possível encontrar duas paradas de ônibus climatizadas, investir em planejamento urbano com ênfase no atual conforto térmico da cidade é um passo importante como medidas de adaptação para o atual cenário de desconforto. Houve dificuldade nas buscas para encontrar dados e pesquisas realizadas na região que abordem da mesma temática. Diante disso, a importância de realização de mais pesquisas sobre o Índice de Desconforto Térmico em áreas urbanas são cruciais para proteger a saúde pública e informar estratégias de adaptação. Elas também são essenciais para o planejamento urbano, contribuindo para a criação de espaços mais confortáveis e resilientes, além de promoverem políticas inclusivas.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Alves, Elis Dener Lima et al. A temperatura do ar e umidade absoluta em cidade de pequeno porte: características espaciais e temporais. **Acta Scientiarum. Human and Social Sciences**, v. 38, n. 2, p. 219-231, 2016.

Amaripadath, Deepak et al. Design optimization of an assisted living facility to improve summer thermal comfort in warming climates. **Journal of Building Engineering**, p. 109814, 2024.

Arsad, Fadly Syah et al. Assessment of indoor thermal comfort temperature and related behavioural adaptations: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 29, p. 73137-73149, 2023.

Artaxo, Paulo. Mudanças climáticas e o Brasil. **Revista USP**, n. 103, p. 8-12, 2014.

Barbosa, Paulo Henrique Dias et al. Variabilidade de elementos meteorológicos e de Conforto Térmico em diferentes ambientes na Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Climatologia**. Ano 11, v. 17, p. 98-118, 2015.

Casagrande, Enrico et al. Water balance partitioning for ecosystem service assessment. A case study in the Amazon. **Ecological Indicators**, v. 121, p. 107155, 2021.

Costa, Carlos Eduardo Aguiar de Souza; Blanco, Claudio José Cavalcante; DE Oliveira-Júnior, José Francisco. IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of Water and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 760-770, 2020.

Costa, Carlos Eduardo Aguiar de Souza; Blanco, Claudio José Cavalcante; DE

Oliveira-Júnior, José Francisco. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, v. 166, n. 3-4, p. 45, 2021.

Castro, Edna Maria Ramos de et al. Estudo socioeconômico dos municípios da região de Tucuruí, Pará (Paper 258). **Papers do NAEA**, v. 1, n. 1, 2010.

Farias, André Luis Assunção de; Do Carmo Magno, Thaissa Souza; Freitas, Marcus Robert Ferreira. Gestão ambiental e impactos socioambientais na Amazônia: o (des) envolvimento a partir da UHE Tucuruí, PA. **P2P E INOVAÇÃO**, v. 7, p. 34-55, 2021.

Ferreira, Danielle Barros; Lima, Edna Cristina; LUZ, Mário Sérgio Freitas da. Variação espacial da temperatura e precipitação e sua associação aos eventos El Niño e La Niña em Tucuruí-PA. In: **XII Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Soc. Bras. de Meteorologia/SBMET, 2002.

Ferreira, Rute Costa et al. Tendência dos índices de instabilidade na América do Sul. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 1, p. 164-169, 2016.

Fisch, Gilberto F.; JANUÁRIO, Mauro; SENNA, Renato C. Impacto ecológico em Tucuruí (PA): Climatologia. **Acta Amazonica**, v. 20, p. 49-60, 1990.

Fisch, Gilberto; MARENGO, José A.; Nobre, Carlos A. Clima da Amazônia. **Climanálise-Boletim de Monitoramento e Análise Climática-Edição Comemorativa**, v. 10, 1996.

Hartabela, Dadang; Dewancker, Bart Julien; Koerniawan, Mochamad Donny. A Relationship between Micro-Meteorological and Personal Variables of Outdoor Thermal Comfort: A Case Study in Kitakyushu, Japan. **Sustainability**, v. 13, n. 24, p. 13634, 2021.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas. **Cidades, Panorama Tucuruí**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tucuruui/panorama>>. Acesso em 20 de outubro de 2023.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Projeções Climáticas**. Disponível em: <<http://www.ccst.inpe.br/projetos/projecoes-climaticas-aplicacoes/>>. Acesso em: 01 de novembro de 2023.

Pedreira Junior, Altemar Lopes et al. Temperatura, umidade relativa do ar e índice de desconforto térmico (IDT) no município de Boca do Acre-Amazonas. **EDUCamazônia**, v. 20, n. 1, p. 75-86, 2018.

Peeters, Robin et al. Energy performance and climate dependency of technologies for fresh water production from atmospheric water vapour. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 6, n. 8, p. 2016-2034, 2020.

Lima, Vinícius Santini de. **EtaModelCC: um pacote R para visualização de dados de mudanças climáticas geradas pelo CPTEC/INPE**. 2019.

Manavvi, S.; Rajasekar, E. Evaluating outdoor thermal comfort in urban open spaces in

a humid subtropical climate: Chandigarh, India. **Building and Environment**, v. 209, p. 108659, 2022.

Monteiro, José Carlos Ramos et al. Descrição da temperatura e umidade relativa do ar em distintas localidades da cidade de Manaus com diferentes geometrizações e espacialidades urbanas nos Bairros Do Parque Dez, Nova Cidade e Bairro Centro-Manaus/Am. **Igapó**, v. 10, n. 1, 2016.

Nobre, Carlos et al. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759-10768, 2016.

Oliveira, Nathalia Capellini Carvalho. Cidade-empresa e controle da mão de obra na construção da usina hidrelétrica de Tucuruí (1974-1984). **Revista Mundos do Trabalho**, v. 12, p. 1-23, 2020.

Ren, Jianlin et al. A review on the impacts of urban heat islands on outdoor thermal comfort. **Buildings**, v. 13, n. 6, p. 1368, 2023.

Ribeiro, Pedro Leite; Navas, Carlos. A macrofisiologia e sua importância em estudos sobre mudanças climáticas. **Revista da Biologia**, v. 8, p. 1-4, 2018.

Ribeiro, Roberta Everllyn Pereira et al. Análise da tendência climática nas séries temporais de temperatura e precipitação de Tucuruí-Pará. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 5, p. 798-807, 2014.

Souza, Débora Moreira de; Nery, Jonas Teixeira. O conforto térmico na perspectiva da climatologia geográfica. *Geografia (Londrina)*, v. 21, n. 2, p. 65-83, 2012.

Thom, Earl Crabill. The discomfort index. **Weatherwise**. 12,57–61, 1959.

Yan, Haiyan et al. The coupled effect of temperature, humidity, and air movement on human thermal response in hot–humid and hot–arid climates in summer in China. **Building and Environment**, v. 177, p. 106898, 2020.

Watanabe, Masahiro et al. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010.