



RÔMULO GONÇALVES PEREIRA BRAGA

**A CARACTERIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO
ESTADO DE MINAS GERAIS A PARTIR DE DADOS DE
REANÁLISE**

**LAVRAS - MG
2023**

JRÔMULO GONÇALVES PEREIRA BRAGA

**A CARACTERIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO
ESTADO DE MINAS GERAIS A PARTIR DE DADOS DE
REANÁLISE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho
Orientador

LAVRAS - MG
2023

RÔMULO GONÇALVES PEREIRA BRAGA

**A CARACTERIZAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO ESTADO DE MINAS
GERAIS A PARTIR DE DADOS DE REANÁLISE**

**THE THERMAL COMFORT CHARACTERIZATION IN THE STATE OF MINAS
GERAIS USING REANALYSIS DATA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Marcelo Vieira da Silva Filho

Orientador

**LAVRAS - MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Partindo do fim para chegar ao começo, trilhando esse caminho que não sabemos onde nos leva, mas, no fim, o que realmente importa, são as experiências que cultivamos na jornada.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, José Reinaldo e Elaine, por sempre estarem presentes, mesmo que distantes, e pelo apoio, e que, sem esse apoio, essa jornada não estaria se concretizando neste momento. À minha irmã, Naira, por todas as conversas e momentos em que, apenas em poucas palavras, muitas coisas seriam realizadas de um jeito melhor.

Essa jornada em Lavras me trouxe uma nova família, a qual me ensinou e aprendeu muito junto comigo, assim, agradeço a República Pinga Nelas, ao Moisés, Túlio, Guilherme Kelade, Rafael, Andrew, Vitor, Paulo, Cauã, Pedro, Marcos Paulo, Guilherme Padilha, Mateus, Guilherme Trindade e André, onde todos me acolheram desde quando pisei em Lavras pela primeira vez, estão até os dias de hoje e estarão comigo até o dia em que todos conheçam esse nome.

Também sou muito grato ao meu orientador Marcelo Vieira da Silva Filho, por todo apoio e paciência ao longo desses longos e corridos meses. Também agradeço por todas as conversas, ensinamentos e podcasts, pois de sua maneira, todos eles tiveram sua parcela de apoio na construção deste trabalho e (espero) dos próximos que ainda estão por vir.

Grande parte da minha estadia em Lavras foi em companhia de pessoas incríveis, cada uma com seu jeito de ser e suas particularidades, assim, agradeço a Gabriela, Vinicius, Thays, Hieda, Leonardo, Lucas, Gabriel, Veronica, Bruna, Pietra, Gustavo e a todos do 19/1 por todo companheirismo que o nosso país Lavras nos ensina, por toda a ajuda nos momentos difíceis e pela alegria dos bons momentos, são memórias que irei guardar para sempre, e experiências que contribuiram para ser quem sou hoje.

É certo que em toda caminhada, precisamos de pessoas ao nosso lado, sendo assim, também sou grato a toda a turma da Engenharia Ambiental e Sanitária 2019/1, que estiveram comigo desde o começo, e continuam comigo até o final (mesmo quando parecia que não teria mais fim), em especial ao Pedro, Annelise, Livia, Higor, Ana, Isabela e a nossa agregada, Valesca, por toda a ajuda nos dias difíceis e pela alegria das vitórias, mesmo que pequenas.

Agradeço fortemente a Suzana, pois sua disponibilidade e ajuda nos momentos em que mais precisei, foram (e continuam sendo) cruciais para a realização de todo esse trabalho

desde dicas até conselhos preciosos que me engrandeceram muito nesse pouco tempo e foram de grande valia para a reta final da minha graduação.

Ao Tiago, Guilherme e Gustavo, que estão presentes comigo nesse momento de mudança e de novas experiências, que vem me ensinando mais a cada dia, incentivando e mostrando caminhos para que eu possa conseguir atingir meus objetivos.

Por fim, agradeço à Lavras, à UFLA e a todos que fizeram parte dessa conquista, mesmo que com uma mínima contribuição, todos foram importantes nesses últimos anos e me trouxeram memórias, experiências e aprendizados que levarei comigo para a vida toda, pois o fim, é apenas um novo começo.

Obrigado por tudo.

RESUMO

O avanço tecnológico traz consigo consequências variadas em todo o planeta. Mudanças climáticas ocorrem desde sempre, mas são aceleradas pela presença e exploração que o homem realiza, alterando o clima, vegetação, propriedades do solo e o conforto das pessoas em ambientes diversos. Sendo assim, este trabalho visou demonstrar a influência antrópica no conforto térmico no estado de Minas Gerais no século XXI. Os dados foram obtidos a partir do ERA5, e utilizou-se dados mensais de temperatura, temperatura de ponto de orvalho e velocidades de ventos horizontais que se deslocam para leste e norte, posteriormente, esses dois últimos foram manipulados em linguagem R para darem origem a uma única variável do mesmo. Dados de latitude e longitude também foram obtidos através dele. Tal manipulação foi feita por meio do Ambiente R (R + RStudio), o qual permitiu a visualização desses dados, bem como sua aplicação direta nas fórmulas para que de forma facilitada, e mais direta, fosse obtida a umidade média das áreas do estado, e posteriormente, gerar os índices relacionados ao conforto térmico, índice de desconforto térmico, índice de temperatura e umidade e índice de temperatura em função do vento, onde pôde-se perceber semelhanças e diferenças entre esses índices, tais como índices anuais variando entre 15 e 26 °C, bem como observar um panorama do conforto térmico em todo o estado, demonstrando períodos de desconforto térmico ao longo dos anos, seja ele relacionado ao frio ou excesso de calor, a partir dos dados mensais estudados, deixando também uma oportunidade de estudo dessas mesmas variáveis mas utilizando dados diários e podendo fazer a comparação entre os dois métodos.

Palavras chave: Conforto térmico. ERA 5. RStudio. Minas Gerais.

ABSTRACT

Technological advancement brings with it varied consequences across the planet. Climate change has always occurred, but it is accelerated by the presence and exploration carried out by man, altering the climate, vegetation, soil properties and the comfort of people in different environments. Therefore, this work aimed to demonstrate the anthropogenic influence on thermal comfort in the state of Minas Gerais in the 21st century. The data were obtained from ERA5, and monthly data on temperature, dew point temperature and horizontal wind speeds moving east and north were used. Later, these last two were manipulated in R language to give rise to a single variable of the same. Latitude and longitude data were also obtained through it. This manipulation was carried out using the R Environment (R + RStudio), which allowed the visualization of this data, as well as its direct application in the formulas so that, in an easier and more direct way, the average humidity of the areas of the state could be obtained, and subsequently, generate indices related to thermal comfort, thermal discomfort index, temperature and humidity index and temperature index depending on the wind, where similarities and differences between these indices could be seen, such as annual indices varying between 15 and 26 °C, as well as observing an overview of thermal comfort throughout the state, demonstrating periods of thermal discomfort over the years, whether related to cold or excess heat, based on the monthly data studied, also leaving an opportunity for study of these same variables but using daily data and being able to make a comparison between the two methods.

Keywords: Thermal comfort. ERA5. RStudio. Minas Gerais.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição das camadas atmosféricas	13
Figura 2 - Mapa das mesorregiões de Minas Gerais.....	20
Figura 3 - Umidade relativa média no estado de Minas Gerais no século XXI	21
Figura 4 - Temperatura média no estado de Minas Gerais no século XXI	22
Figura 5 - Índice de Desconforto Térmico (IDT) no século XXI em Minas Gerais	23
Figura 6 - Índice de Desconforto Térmico (IDT) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.....	24
Figura 7 - Índice de Temperatura e Umidade (ITU) no século XXI em Minas Gerais.....	25
Figura 8 - Índice de Temperatura e Umidade (ITU) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.....	26
Figura 9 - Temperatura Efetiva em função do vento no século XXI em Minas Gerais.....	27
Figura 10 - Temperatura Efetiva em função do vento (TEv) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.....	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. OBJETIVO.....	11
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	11
3.1. Camadas atmosféricas.....	11
3.2. Índices de conforto térmico.....	14
3.2.1. Índice de Desconforto Térmico de Thom.....	14
3.2.2. Índice de Temperatura e Umidade.....	15
3.2.3. Temperatura Efetiva em função do vento.....	15
3.3. Dados de reanálise.....	16
4. METODOLOGIA.....	17
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
5.1. Descrição da área de estudo e dados meteorológicos.....	19
5.2. Descrição dos resultados.....	21
5.2.1. Índice de Desconforto Térmico.....	22
5.2.2. Índice de Temperatura e Umidade.....	24
5.2.3. Temperatura Efetiva em função do vento.....	26
6. CONCLUSÃO.....	28
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1. INTRODUÇÃO

Os fluxos radioativos na superfície terrestre, nos dias de hoje, são importantes variáveis determinantes do clima ambiente local, bem como fornecem a energia necessária para uma vasta gama de processos climáticos vitais. Mudanças nesses fluxos são determinantes em uma grande variedade de questões ambientais, entre as quais pode-se citar, a disponibilidade de água, redução das geleiras, o orçamento de carbono e as mudanças climáticas (SINSEL et. al., 2022).

De acordo com dados do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2023), as alterações climáticas causadas pelo homem, se estendem por mais de um século de emissões, sejam elas para a geração de energia, uso do solo e sua alteração, estilo de vida e padrões de consumo e produção.

De uma maneira mais direta, pode-se dizer que as variações na quantidade de radiação solar que atingem a superfície do planeta, tem influência direta em processos como a produção agrícola mundial e o mercado de geração de energia solar (WILD, 2015). A partir dos dados disponíveis sobre a diferença entre a temperatura máxima e mínima diária (DTR) observa-se consideráveis mudanças na decadais na radiação solar incidente (SSR), essa variável permite observar de forma separada o aquecimento radiativo solar e o térmico da superfície, podendo-se assim, fazer uma análise mais criteriosa sobre o mesmo. Como a SSR (radiação solar incidente) se faz presente somente durante o período diurno, sua incidência afeta de forma substancial mais a temperatura máxima diária que a temperatura mínima diária, onde, tem-se esta última sendo determinada principalmente por trocas radiativas térmicas (WILD, 2015).

Além da influência direta na dinâmica dos processos climáticos e de atividades que dependem do clima como, por exemplo, a produção agrícola, o fluxo de radiação incidente sobre a terra tem grande importância na qualidade de vida das pessoas, e uma série de fatores (de ordem física e psicobiológica) podem aumentar ou reduzir a sensação de conforto experienciada pelos indivíduos. Nesse contexto, o conforto térmico pode ser entendido como um balanço neutro entre a qualidade da ambiência e a ausência de desejo de mudar sua interação com o meio, ou seja, é uma condição subjetiva decorrente do ajustamento corporal, comportamental e expectativas pessoais, as quais resultam da interação complexa e dinâmica entre o homem e o ambiente. (WILD, 2015; VIEIRA et al., 2018; MARTINI; BIONDI; BATISTA, 2019;).

Em meados da década de 70, estudos sobre o conforto térmico passaram a ganhar notoriedade e, a partir dos trabalhos de Povl Ole Fanger, a perspectiva de análise desse parâmetro passou a incluir métodos quantitativos, além dos qualitativos. Em estudos acerca das décadas de 1960 e 1970, Fanger postulou uma fórmula matemática relacionando o conforto térmico com seis principais parâmetros: temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa, velocidade do vento e a atividade dos materiais constituintes das vestimentas (ZHAO; LIAN; LAI, 2021). O primeiro modelo de conforto térmico derivado deste postulado foi o PMV (*Predicted Mean Votes*) que, combinado com as teorias a respeito da regulação térmica do corpo humano, se baseia na relação linear existente entre a temperatura da pele, taxa de transpiração e intensidade de atividade realizada. Além do PMV, modelos de dois e vários nós constituem a base clássica dos índices de conforto térmico (ZHAO; LIAN; LAI, 2021). Desde então, inúmeros outros índices foram desenvolvidos com base nos já mencionados, a exemplo do Índice de Desconforto Térmico de Thom (IDT), Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Temperatura Efetiva (TE), Temperatura Efetiva em função do vento (TEv) (XAVIER, et al., 2022).

De acordo com Xavier (2022), ambientes termicamente confortáveis são aqueles que provêm o bem-estar das pessoas, tendo em mente que a sensação de calor é diferente de um para outro, sendo assim, subjetivo. A escassez de estudos sobre esse tema no estado de Minas Gerais, principalmente no que tange à parte sul do estado, dificulta a compreensão do mesmo e traz à tona a necessidade de um olhar mais cuidadoso sobre o tema, principalmente devido às mudanças climáticas que enfrentamos nos dias de hoje.

Dentre os estudos existentes no estado, destaca-se o realizado por Xavier (2022), na cidade de Viçosa, o qual verificou em seus estudos que, no ano de 2014, ocorreram situações de desconforto térmico devido ao frio, atingindo valores de temperatura efetiva próximos a 13,0 °C, e que os valores de umidade se mantiveram próximos às médias previamente analisadas.

Dados de reanálise são produzidos executando versões atualizadas dos modelos numéricos de previsão do tempo, que assimilam sequencialmente dados observados da atmosfera e da superfície para reconstruir as variáveis de estado da superfície terrestre, oceanos e atmosfera do passado (PELOSI et al., 2020). Um controle de qualidade rigoroso é necessário para evitar tendências espúrias nesses dados, e nem todos os registros estão devidamente homogêneos até o momento. Além disso, possíveis 'efeitos de urbanização' nos dados de SSR podem afetar as magnitudes das tendências e sua representatividade para

áreas em maior escala, embora esse efeito possa não ser tão pronunciado como afirmado em alguns estudos (WILD, 2015).

O uso de dados de reanálises tem sido favorecido pois sua utilização é gratuita, por meio de plataformas dedicadas a isso. Apesar de pouco difundido, esses dados englobam uma parcela considerável de tempo e se encontram prontos para uso, abrangendo uma larga gama de índices, tais como temperaturas, radiações e ventos. Os meios eletrônicos de armazenamento desses dados também fazem o tratamento do mesmo, para que este esteja disponível de uma forma padronizada, visto que há dados na plataforma recebidos de diferentes coletores dos mesmos (PELOSI et al., 2020).

Os dados de reanálises começaram a ser divulgados no ano de 2019, por meio do *Copernicus Climate Change Service* (HERSBACH et al., 2020; PELOSI et al., 2020). O ERA5 se trata da quinta geração do serviço global de reanálises vinculado ao ECMWF (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Longo Prazo), sendo sucessor do ERA-Interim, percorrendo toda a extensão do planeta desde o ano de 1979 e possuindo uma resolução espacial aproximada de 31 km. Também em 1979, o *Copernicus Climate Change Service*, divulgou o ERA5-land, o qual possuía as mesmas características do ERA5, mas com uma resolução horizontal mais precisa, de 9 km. O ERA5 provia ao ERA5-land, por meio de suas variáveis atmosféricas, as forçantes atmosféricas ali utilizadas, dentre elas pode-se citar a temperatura do ar, umidade e pressão atmosférica, sendo corrigidas pela resolução e utilizadas para os cálculos de suas variáveis (COPERNICUS, 2023).

Desta forma, com este trabalho determinar índices para todo o estado de Minas Gerais utilizando equações de conforto térmico bem como dados provenientes do ERA5.

2. OBJETIVO

Avaliar o conforto térmico no estado de Minas Gerais ao longo do século XXI, por meio de dados provenientes do ERA5, e através do cálculo de três índices específicos, Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Índice de Desconforto Térmico (IDT) e Temperatura Efetiva em função do vento (TEv).

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Camadas atmosféricas

De acordo com Vianello (2000) atmosfera terrestre é constituída por partículas sólidas, massas líquidas e elementos gasosos, os quais estão em constante movimento e se misturando.

Somente em situações particulares ocorrem combinações de gases entre si, como é visto em reações fotoquímicas. Mesmo com toda a tecnologia e acervo científico, ainda não foi possível equacionar de forma desejável os mecanismos de funcionamento da atmosfera.

Por ser uma camada constituída essencialmente por gases, a atmosfera é a camada mais tênue presente no planeta, sendo sua massa 1.000.000 de vezes menor que a massa sólida da Terra (VIANELLO, 2000). Além disso, a atmosfera é constituída quase que exclusivamente por um diminuto número de elementos, os quais são demonstrados na Tabela 1.

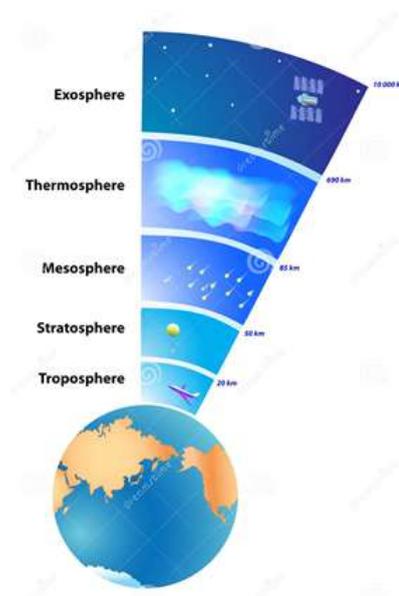
Tabela 1 - Constituição da atmosfera terrestre

Constituinte	Conteúdo (% por volume)
Nitrogênio - N ₂	78,084
Oxigênio - O ₂	20,948
Argônio - Ar	0,934
Neônio - Ne	1,818 * 10 ⁻³
Hélio - He	5,24 * 10 ⁻⁴
Metano - CH ₄	2 * 10 ⁻⁴
Criptônio - Kr	1,14 * 10 ⁻⁴
Hidrogênio - H ₂	0,5 * 10 ⁻⁴
Xenônio - Xe	0,087 * 10 ⁻⁴

Fonte: Adaptado de Vianello (2000)

De acordo com Queiroz et al. (2020), a atmosfera é dividida em algumas camadas, conforme ilustrado na Figura 1, sendo elas a troposfera, estratosfera, mesosfera, e exosfera onde, a mudança de uma camada para outra se dá por meio de variações em suas características físico-químicas.

Figura 1 - Distribuição das camadas atmosféricas



Fonte: Adaptado de Queiroz et al. (2020)

A troposfera, camada mais próxima à superfície terrestre, contém o ar do qual os seres humanos utilizam para a respiração, e também a mais prejudicada pelas intervenções antropogênicas que ocorrem em todo o planeta. A estratosfera se trata da camada que protege a Terra contra radiações solares, absorvendo e dissipando parte da mesma (CETESB, 2019).

A Resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 3/1990 (BRASIL, 1990), diz que a poluição atmosférica é toda forma de matéria ou energia, que, a partir de uma determinada intensidade e em concentração acima dos níveis estabelecidos, tornem o ar impróprio à saúde humana.

De acordo com Zhang (2019), a diminuição nas emissões e o tratamento da poluição atmosférica irão produzir importantes benefícios para a saúde humana, sendo esta uma questão cada vez mais importante e de preocupação global. Essa mesma poluição do ar, se faz um importante acelerador para o processo de aquecimento global, elevando mais rapidamente as temperaturas no planeta, e trazendo consigo maiores valores nos índices de conforto térmico.

A seguir, serão elucidados alguns dos principais índices utilizados para avaliação do conforto térmico, bem como os modelos utilizados para calculá-los e a relação com a proposta desta pesquisa.

3.2. Índices de conforto térmico

Em meados da década de 70 estudos sobre o conforto térmico passaram a ganhar notoriedade e, a partir dos trabalhos de Povl Ole Fanger, a perspectiva de análise desse parâmetro passou a incluir métodos quantitativos, além dos qualitativos. os estudos acerca From 1960s to 1970s. Fanger postulou uma fórmula matemática relacionando o conforto térmico com seis principais parâmetros: temperatura do ar, temperatura radiante, umidade relativa, velocidade do vento e a atividade dos materiais constituintes das vestimentas (ZHAO; LIAN; LAI, 2021). A partir de uma sucessão de modelos matemáticos relacionando as variáveis acima citadas destacam-se, no contexto desta pesquisa, os seguintes índices de conforto térmico: **Índice de Desconforto Térmico de Thom (IDT)**, **Índice de Temperatura e Umidade (ITU)** e **Temperatura Efetiva em função do vento (TEv)** (XAVIER, et al., 2022).

3.2.1. Índice de Desconforto Térmico de Thom

Conforme descrito por Leal et al., (2017) o IDT designa uma relação entre a umidade relativa do ar e a temperatura média, e pode ser obtido através da Equação 3.3.1:

$$IDT = [Ta - (0,55 - 0,0055 * UR) - (Ta - 14,5)] \quad (3.3.1)$$

Onde Ta representa a temperatura do ar (em °C) e UR a umidade relativa (em %).

O IDT considera o ambiente confortável quando as sensações térmicas dos indivíduos nele presente estão menores que 24°C, parcialmente confortável quando variam entre 24°C e 26°C, desconfortável para sensações entre 26°C e 28°C, e muito desconfortável quando estão maiores ou iguais a 28°C, conforme a tabela 2:

Tabela 2: Faixas de Classificação de sensação térmica do Índice de Desconforto Térmico

Fator	IDT (°C)	Níveis de conforto
1	IDT < 24,0	Confortável
2	24,0 ≤ IDT ≤ 26,0	Parcialmente confortável
3	26,0 < IDT < 28,0	Desconfortável
4	IDT ≥ 28,0	Muito desconfortável

Fonte: adaptado de Xavier et al., 2022

Xavier et al. (2022) menciona em seu trabalho a possibilidade de utilizar o IDT como referência na elaboração de políticas públicas relacionadas ao planejamento e gestão ambiental, indicando grande necessidade de intervenções, visando assegurar condições de conforto térmico urbano.

3.2.2 Índice de Temperatura e Umidade

O próximo índice utilizado é o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), que estabelece três níveis de conforto para o ambiente externo, conforme tabela 3:

Tabela 3: Faixas de Classificação de sensação térmica do Índice Temperatura e Umidade (ITU)

Fator	ITU (°C)	Níveis de conforto
1	$21,0 \leq ITU \leq 24,0$	Confortável
2	$24,0 \leq ITU \leq 26,0$	Levemente desconfortável
3	$26,0 < ITU$	Extremamente desconfortável

Fonte: adaptado de Xavier et al., 2022

Leal et al. (2017) menciona que esse índice é apropriado para regiões localizadas nos trópicos e avalia o “stress” no ambiente urbano. O cálculo que expressa o ITU está descrito na Equação 3.3.2:

$$ITU = \left\{ 0,8 * Ta + \left[\frac{UR * Ta}{500} \right] \right\} \quad (3.3.2)$$

Onde, Ta representa a temperatura do ar (em °C) e UR a umidade relativa (em %).

3.2.3. Temperatura Efetiva em função do vento

O índice Temperatura Efetiva em função do vento (TEv), além de também estabelecer uma relação entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, considera dados de velocidade do vento, apresentando onze faixas distintas de níveis de conforto térmico, conforme exposto na Tabela 4 (XAVIER et al., 2022).

Tabela 4: Distribuição das zonas de conforto para diferentes graus de percepção térmica e suas respostas fisiológicas do Índice de Temperatura Efetiva (TE) e do Índice de Temperatura Efetiva em função do vento (TEv)

Fator	TE/TEv (°C)	Sensação térmica	Grau de estresse fisiológico
1	< 13	Muito frio	Extremo estresse ao frio
2	13 / 16	Frio	Tiritar
3	16 / 19	Frio moderado	Ligeiro resfriamento do corpo
4	19 / 22	Ligeiramente frio	Vasoconstrição
5	22 / 25	Confortável	Naturalidade Térmica
6	25 / 28	Ligeiramente Quente	Ligeiro suor e vasodilatação
7	28 / 31	Quente moderado	Suando
8	31 / 34	Quente	Suor em profusão
9	> 34	Muito quente	Falha na termorregulação

Fonte: adaptado de Xavier et al., 2022

A equação utilizada para o cálculo de TEv é a mesma encontrada em Suping et al. (1992), e é descrita pela equação 3.3.3:

$$TEv = 37 - \left(\frac{(37 - Ta)}{(0,68 - (0,014 * UR) + \frac{1}{1,76 + 1,4 * V^{0,75}})} \right) - (0,29 * Ta * (1 - \frac{UR}{100})) \quad (3.3.3)$$

Onde, Ta representa a temperatura do ar (em °C), UR a umidade relativa (em %) e V representa a velocidade do vento (em m/s).

3.3. Dados de reanálise

Cada vez mais, a obtenção de dados para estudos sobre aquecimento global e suas vertentes se tornam mais relevantes nos dias de hoje. De acordo com Soci (2016), os dados obtidos a partir de reanálise se tratam de informações confiáveis e precisas, fornecendo descrições de estados meteorológicos de qualidade e abrangem previsões climatológicas amarradas a observações tanto terrestres quanto atmosféricas, a partir de diversos modelos e fontes de dados, a fim de criar um conjunto de dados de qualidade e que aborde diferentes variáveis climáticas em um variado período de tempo. Dados, como os fornecidos pelo ERA5, são disponibilizados de forma gratuita, em plataforma online, podendo ser obtidos de forma simplificada e filtrados da maneira que for desejada. É disponibilizado de forma regular, mas há uma pequena defasagem em sua publicação na plataforma, devido à necessidade de processamento do mesmo (PELOSI et al., 2020).

Os dados do ERA5 podem ser encontrados em variações de tempo horária ou mensal, assim pode-se ter 24 valores diários de todos os 50 índices disponíveis, bem como a média mensal dos mesmos índices, este último será utilizado neste trabalho. A tecnologia na qual se

baseia o ERA5 traz consigo inúmeros benefícios na sua aplicação e qualidade dos dados, sendo que a diminuição de sua resolução dos antigos 31 para 9 quilômetros (PELOSI et al., 2020).

4. METODOLOGIA

Para avaliar o comportamento dessas variáveis de conforto térmico no decorrer do século no estado de Minas Gerais, procedeu-se à realização de estudo quantitativo, por meio da análise de dados meteorológicos e cálculos de índices de conforto.

Para descrição das características do local definido para estudo, foram coletados dados de latitude, longitude e altitude, temperaturas média, máxima e mínima mensal, e classificação climática de Koppen em bases de dados oficiais (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

A coleta dos dados foi feita por meio do banco de dados climatológicos de reanálise *5th Generation of European ReAnalysis (ERA5)*, produto disponibilizado pelo *European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Nesse banco de dados, coletou-se uma série de índices climatológicos em função do tempo utilizado. Juntamente com esses dados, é escolhida a latitude e longitude do local a ser estudado, a fim de delimitar a área, otimizar a obtenção dos dados e sua posterior manipulação. Assim, tinha-se os dados de temperatura, temperatura de ponto de orvalho e ventos (componentes zonal e meridional) necessários para o prosseguimento. Vale ressaltar que, o vento utilizado nas equações, se trata da média dos dois dados de vento disponíveis no ERA5, a partir da equação abaixo.

$$V = \sqrt{(\text{VentoH})^2 + (\text{VentoV})^2} \quad (4.1)$$

Onde, V é o vento utilizado nos cálculos, VentoH é a velocidade do vento que se desloca em direção à leste e VentoV é a velocidade do vento que se desloca horizontalmente em direção ao norte, ambos os dados obtidos pelo ERA5.

A interpretação dos dados obtidos no ERA5 foi feita por utilização da linguagem de programação R, a partir do software RStudio, para computação estatística dos dados, para a conversão de variáveis, a fim de facilitar o desenvolvimento dos cálculos, e visualização dos gráficos.

Ainda no desenvolvimento dos cálculos, foi necessário calcular todos os valores mensais para a Pressão de Vapor de Água e Pressão de Saturação de Vapor de Água (equação de Tetens), variáveis essas, necessárias para o cálculo da Umidade Relativa, qual seria

posteriormente utilizada nos índices de conforto térmico dispostos neste trabalho. As equações dessas variáveis serão descritas a seguir.

$$E_s = 0,6108 * 10^{\left(\frac{7,5 * (T_a - 273,15)}{237,3 + (T_a - 273,15)}\right)} \quad (4.2)$$

Sendo T_a a temperatura obtida a partir do ERA5 e E_s a pressão de saturação de vapor de água.

O cálculo da pressão de vapor de água foi realizado utilizando-se a temperatura de ponto de orvalho (T_{po}) em uma função específica da linguagem R. Tal função é descrita na equação 4.3.

$$E_a \leftarrow \text{function}(T_d, A) \left\{ \exp \left(\frac{((17,3 * T_d) + (T_d * \log(0,6108) + 237,7 * \log(0,6108)))}{237,7 + T_d} \right) \right\} \quad (4.3)$$

Onde A é o coeficiente psicrométrico, com valor de $0,6108 \text{ C}^{-1}$ e T_d é a temperatura de ponto de orvalho obtida a partir do ERA5.

A última variável a ser calculada, a umidade relativa, é encontrada a partir dos índices anteriores, por meio da seguinte equação:

$$UR = \left(\frac{E_a}{E_s}\right) * 100 \quad (4.4)$$

Na qual UR é a umidade relativa em %.

Neste momento, todas as variáveis necessárias para o cálculo dos índices de conforto térmico propostos estavam calculadas.

Posteriormente, foi necessária a criação de um mapa das mesorregiões do estado, para uma melhor observação, sendo esse feito fora do Ambiente R, sendo assim, foi necessário a obtenção do shapefile, que é um formato de vetor que armazena camadas geográficas, referente às ditas mesorregiões, através do site do IBGE, onde foi coletado o mapa referente ao ano de 2022. Após esse passo, inseriu-se o mapa no software QGIS, e, a partir disso, foi construído o mapa, o qual pode ser visualizado na Figura 3.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Descrição da área de estudo e dados meteorológicos

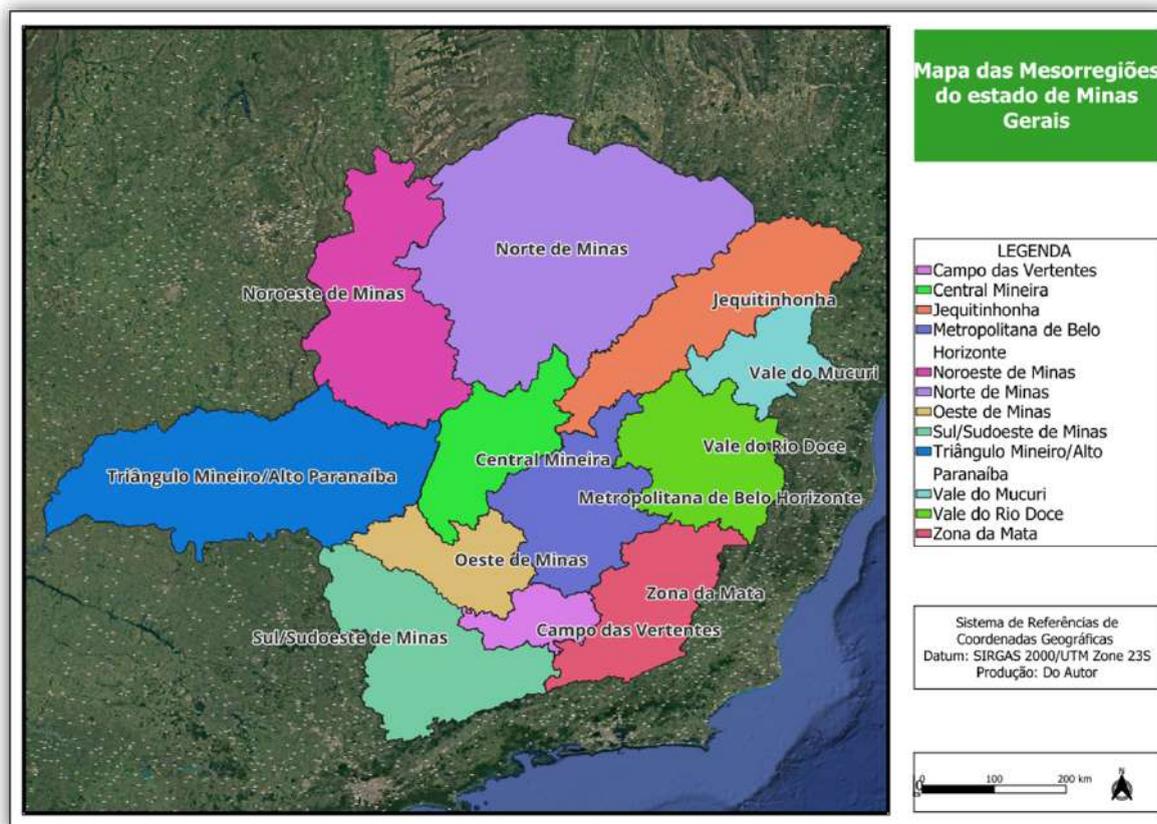
O estado de Minas Gerais encontra-se localizado na região sudeste do Brasil, entre as latitudes 14°13'57" e 22°55'47" e as longitudes 39°51'24" e 51°02'56" e compreende uma área de 582.586 km² (IBGE, 2017).

Apresentando uma geografia peculiar, Minas Gerais possui alguns complexos geográficos, tal como a serra da Mantiqueira, e não faz fronteira com o oceano. Essas características têm influência direta no clima regional, pois o ciclo diurno é influenciado pela distância do oceano. Sua topografia tem altitudes variando entre 76 a 2892 m acima do nível do mar, o que tem atuação na direção e intensidade dos ventos e condições úmidas. Além disso, áreas mais elevadas tendem a ser mais frias que as áreas ao nível do mar (REBOITA et al., 2015).

Durante a estação seca, não há formação de muitas nuvens, mas é corriqueiro observar chuvas de baixa intensidade nas mesorregiões da Zona da Mata e nos Vales do Jequitinhonha, Mucuri e Rio Doce (FIGURA 2). Isso ocorre pela passagem de frentes frias pelo litoral da região. Estações com menos chuvas deixam o ar seco, o céu claro, sem nuvens, nas regiões Noroeste, Triângulo, Oeste, Sul e Central do estado (REIS; ALVES, 2016).

Outro fator que influencia o clima é o tipo de uso e ocupação do solo. Áreas florestadas tendem a usar a energia recebida do Sol na evapotranspiração, enquanto áreas de solo descoberto e urbanizadas a utilizam para se aquecer, impactando diretamente a variação diurna da temperatura do ar. Segundo dados de uso e ocupação do solo do European Commission's Joint Research Centre, MG possui cerca de 44% de seu território utilizado para agricultura intensiva, e 18% de sua área equivale às porções mistas de agricultura e floresta/vegetação degradada (REBOITA et al., 2015).

Figura 2 - Mapa das mesorregiões de Minas Gerais



Fonte: Do autor (2023)

Em termos de clima, existem basicamente duas unidades regionais que fazem parte da área do estado, sendo elas, Clima Tropical Semi-úmido onde tem-se de 4 a 5 meses de seca, englobando as áreas que drenam para o Rio São Francisco e a porção oeste do estado que drena para o oceano Atlântico, e o Clima Tropical Mesotérmico Brando para as áreas de maior altitude (JARDIM et.al., 2019).

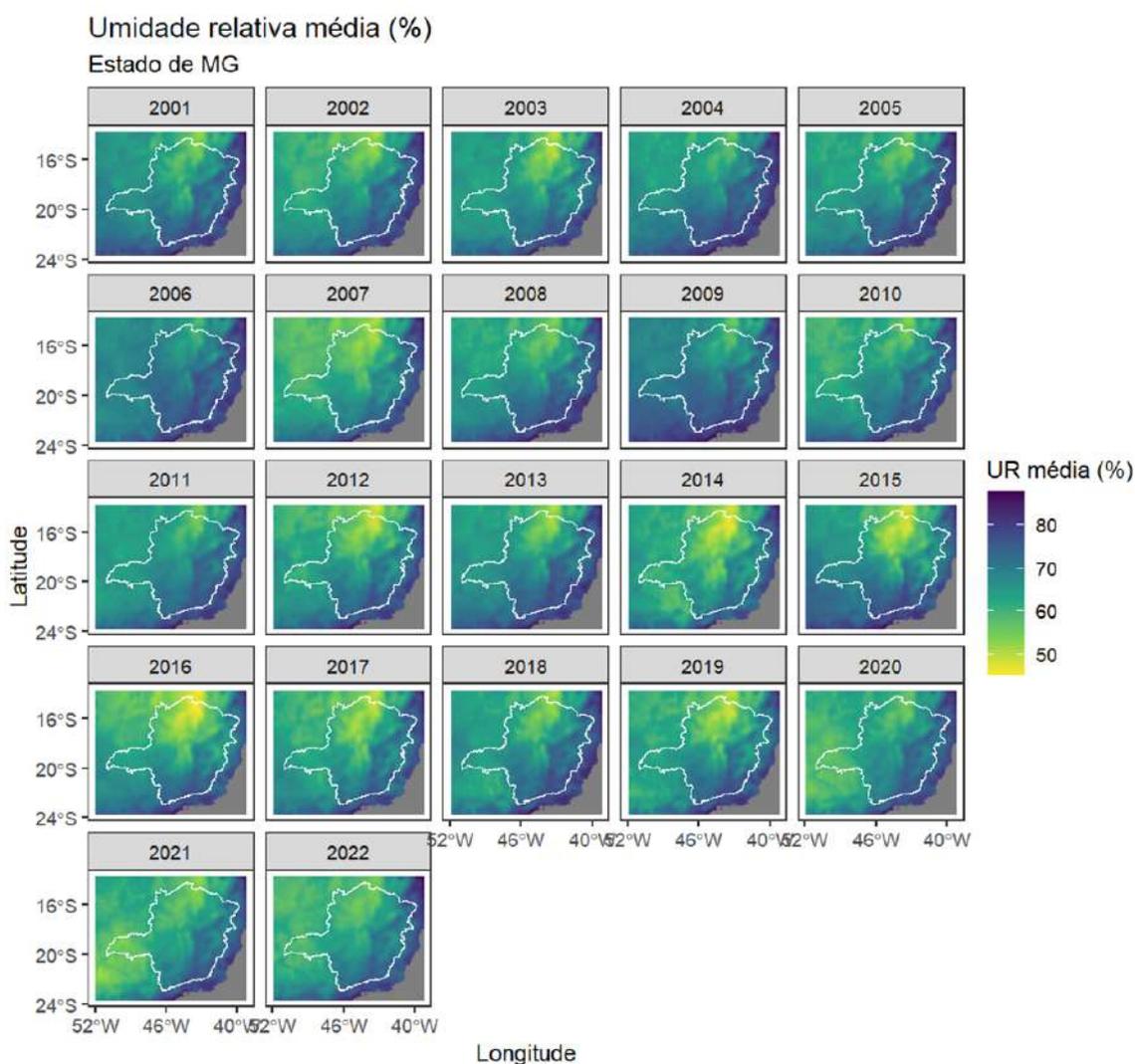
Quanto à precipitação, tem-se o verão de Minas Gerais como a estação mais chuvosa e o inverno a mais seca, sendo o setor centro-sul do estado mais úmido. Inversamente a isso, tem-se a porção norte do estado mais seca. Na estação chuvosa, as precipitações no setor centro-sul podem alcançar os 900 mm, representando aproximadamente 60% de toda a chuva esperada para o ano, enquanto na região norte do estado, essa mesma precipitação fica na casa dos 400 mm. Essas duas regiões também se diferenciam quanto a precipitação total anual, onde esta pode alcançar valores superiores a 1600 mm na região centro-sul contra um máximo de 850 mm na região norte (REBOITA et al., 2015).

5.2. Descrição dos resultados

Conforme anteriormente apresentado, os índices de conforto são diretamente ligados à temperatura, coletada a partir do ERA5, umidade relativa média e velocidade dos ventos, esses dois últimos foram posteriormente calculados, para que os índices propostos neste trabalho pudessem ser obtidos.

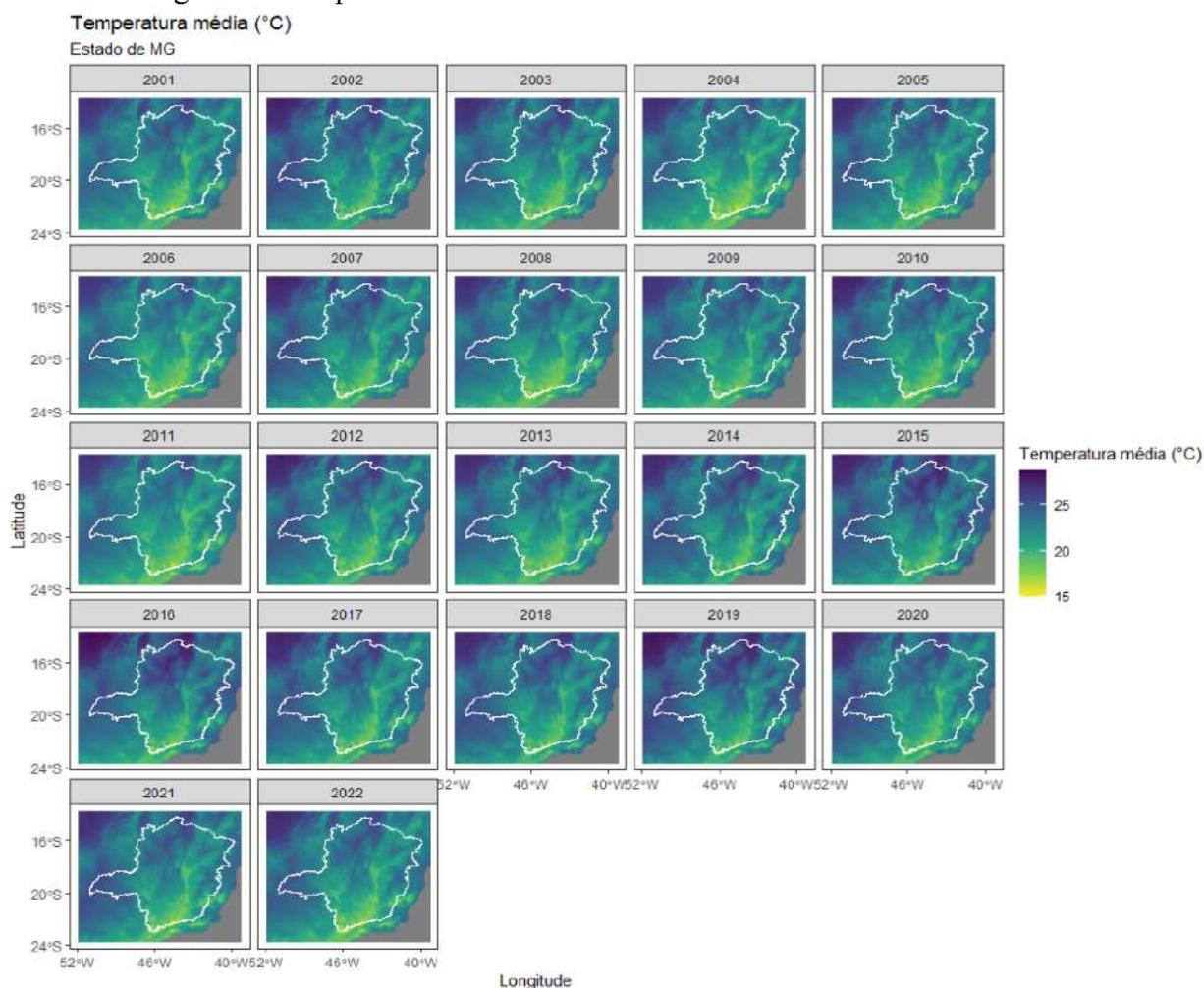
Gerou-se também os mapas do século XXI dessas variáveis, para que se pudesse observar variações temporais das mesmas com o passar dos anos. Tais mapas encontram-se nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Umidade relativa média no estado de Minas Gerais no século XXI



Fonte: do Autor (2023)

Figura 4 - Temperatura média no estado de Minas Gerais no século XXI



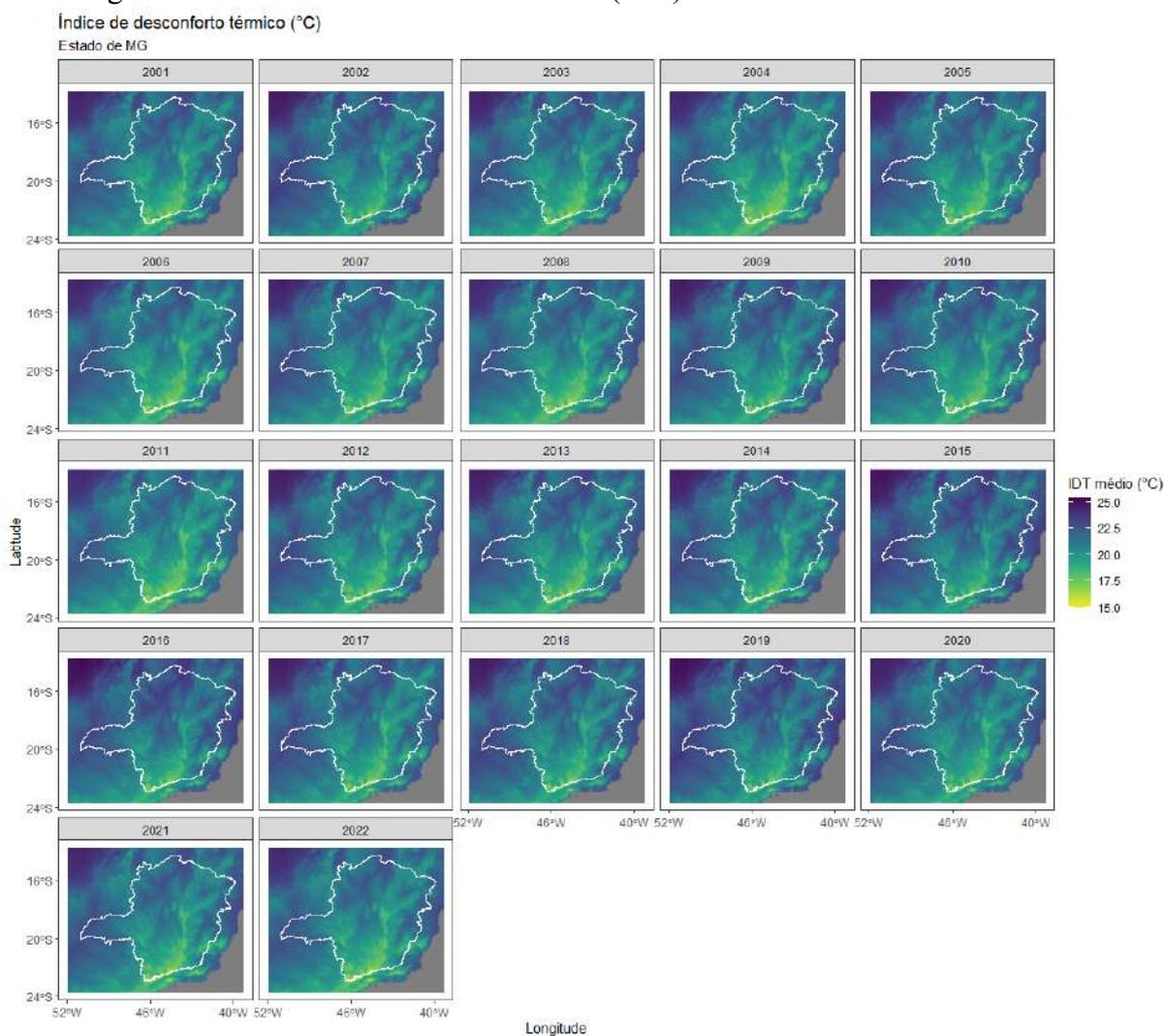
Fonte: do Autor (2023)

A partir dos resultados obtidos, foram gerados mapas relativos às variáveis abordadas neste trabalho, e, a partir dos mesmos, foi possível observar variações no Índice de Desconforto Térmico (IDT), Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Temperatura Efetiva em função do vento (TEv). Essas variações serão observadas a seguir.

5.2.1. Índice de Desconforto Térmico

A Figura 6 representa a média anual do IDT na área estudada, e, a partir dela, pode-se verificar que, nessa situação, não tem-se excessivas áreas classificadas como desconfortáveis (IDT > 26,0).

Figura 5 - Índice de Desconforto Térmico (IDT) no século XXI em Minas Gerais

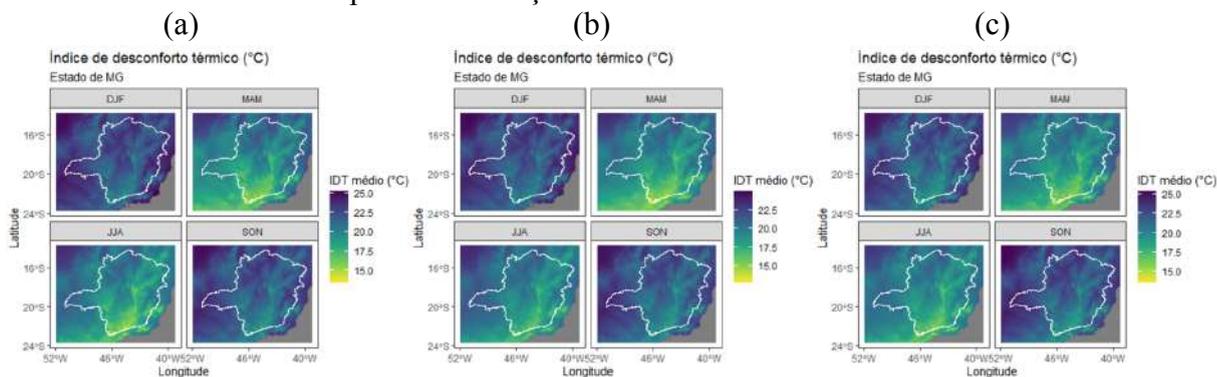


Fonte: do Autor (2023)

Partindo para uma visão mais profunda, e olhando como cada ano se comportou, no que tange esse índice, observou-se maiores variações durante as estações, e a partir delas, pôde-se verificar melhor locais e períodos do ano onde esse índice traz classificações mais altas eu decorrência de maior calor na região.

Na Figura 6 são apresentados os mapas com os Índices de Desconforto Térmico (IDT) para o estado de Minas Gerais nos anos de 2001, 2011 e 2021, separados pelas estações do ano. Pôde-se observar variações discretas no valores encontrados, além de uma maior percepção da sua variação ao longo do ano.

Figura 6 - Índice de Desconforto Térmico (IDT) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.



Fonte: do Autor (2023)

A partir da Figura 6, pode-se inferir que a porção norte do estado de Minas Gerais possui índices classificados como parcialmente confortável, havendo períodos de grande desconforto ao longo dos dias.

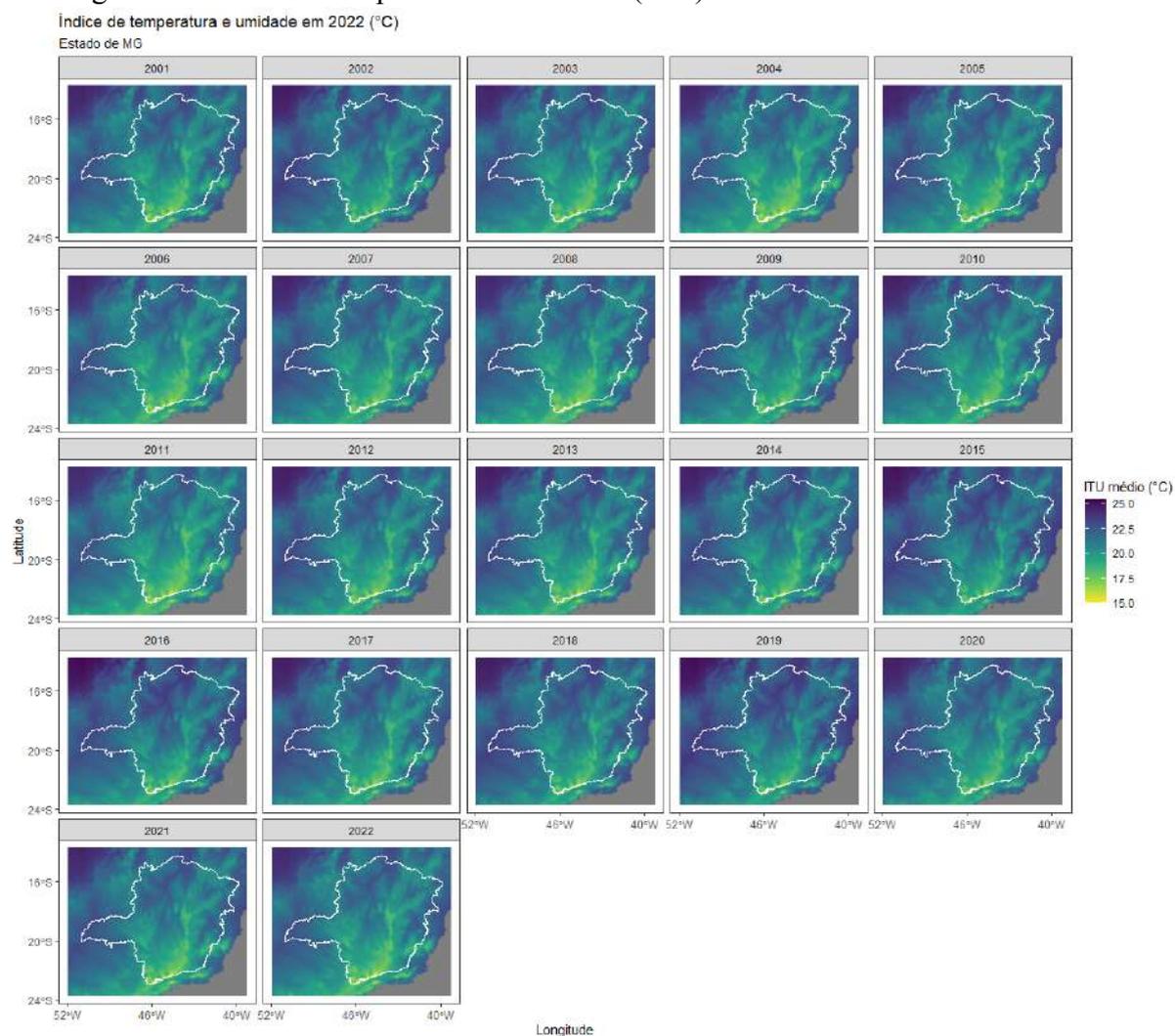
Vale ressaltar que apenas uma medição diária foi explorada, sendo assim, análises referentes ao período diurno ao longo dos anos, apresentaram resultados diferentes dos aqui encontrados, e também uma maior amplitude de seus índices, indicando um maior desconforto em todas as regiões do estado. Tais resultados podem vir a incentivar políticos a terem uma maior atenção com políticas voltadas para o planejamento e a gestão ambiental das cidades, visando assegurar condições adequadas de conforto térmico (XAVIER et al., 2022).

Durante o outono e inverno, para o IDT, foi verificado que, em todos os meses, apenas índices na faixa de confortável foram obtidos, o que indica sensações térmicas amenas, e também uma considerável variação do mesmo, visto que, o estado possui uma grande extensão e seu clima tende a ser mais frio, à medida que se distancia mais da linha do Equador.

5.2.2. Índice de Temperatura e Umidade

Avaliando-se o ITU, tem-se uma abordagem semelhante à encontrada no IDT quando olha-se o índice de forma anual, verificando-se uma variação menos acentuada nos valores encontrados, como pode ser observado na Figura 7.

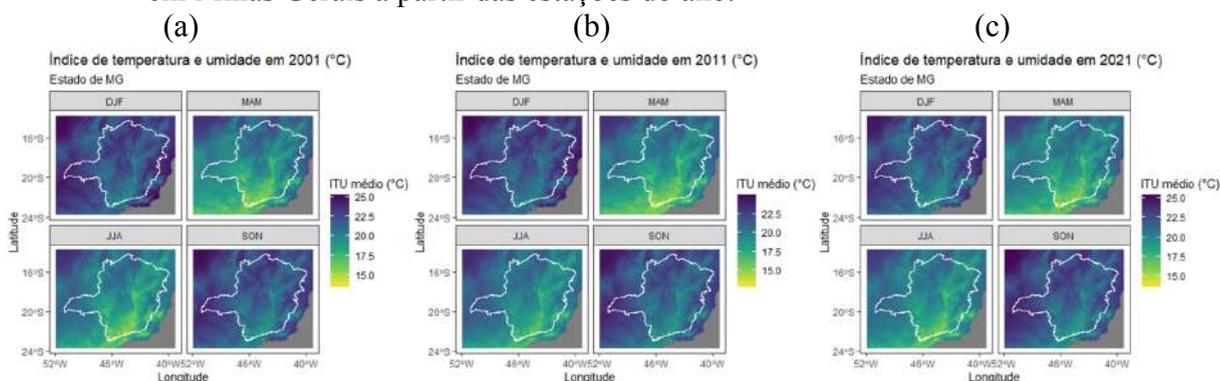
Figura 7 - Índice de Temperatura e Umidade (ITU) no século XXI em Minas Gerais



Fonte: do Autor (2023)

Partindo para uma abordagem mais específica, avaliou-se o que foi encontrado em cada estação ao longo dos anos. Essa perspectiva pode ser vista a seguir:

Figura 8 - Índice de Temperatura e Umidade (ITU) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.



Fonte: do Autor (2023)

A partir dessa interpretação observou-se, assim como no IDT, maiores valores do índice nos períodos chuvosos do ano, nos meses de primavera e verão, onde a temperatura tende a ser maior, principalmente nas regiões central e norte do estado.

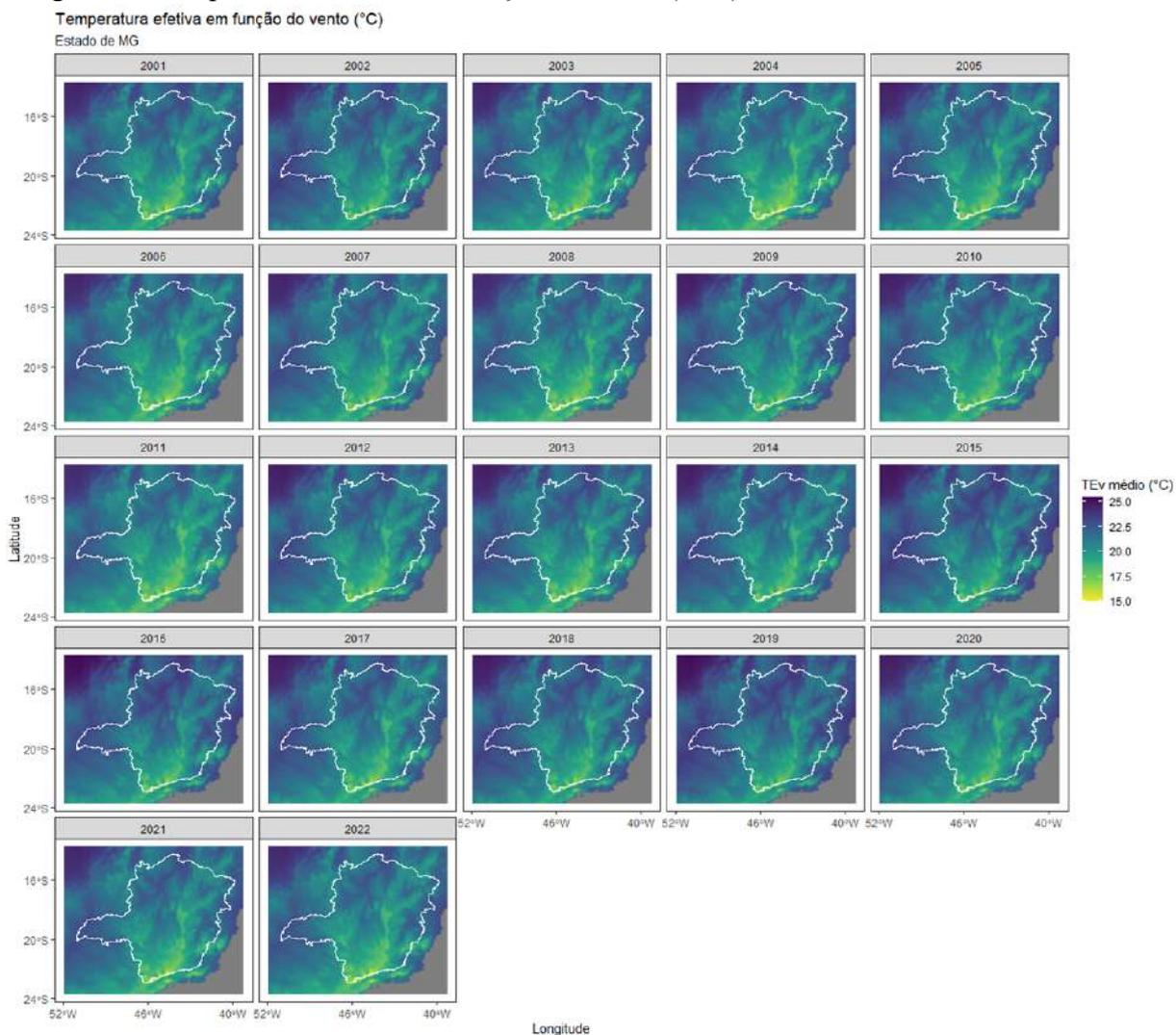
Valores acima de ITU acima de 24 em horários noturnos e no período da madrugada podem indicar a ocorrência de retardo no esfriamento local por um longo período (REIS; ALVES, 2016)

Assim, tem-se longos períodos de tempo apresentando sensações classificadas como levemente desconfortáveis e algumas como extremamente desconfortáveis, diferente do que foi encontrado em IDT.

5.2.3. Temperatura Efetiva em função do vento

Ao se analisar o TEv anual encontrado a partir dos cálculos realizados no RStudio, continua-se como parâmetros parecidos aos encontrados nas duas variáveis anteriores, notando-se pequenas variações com o passar dos anos. Essa variação também tem um contexto sazonal, sendo influenciada por massas de ar ao longo dos anos, tais como a massa Equatorial continental (mEc) e a Frente Estacionária (FE) (LEAL et al., 2017), como pode ser observado na Figura 9.

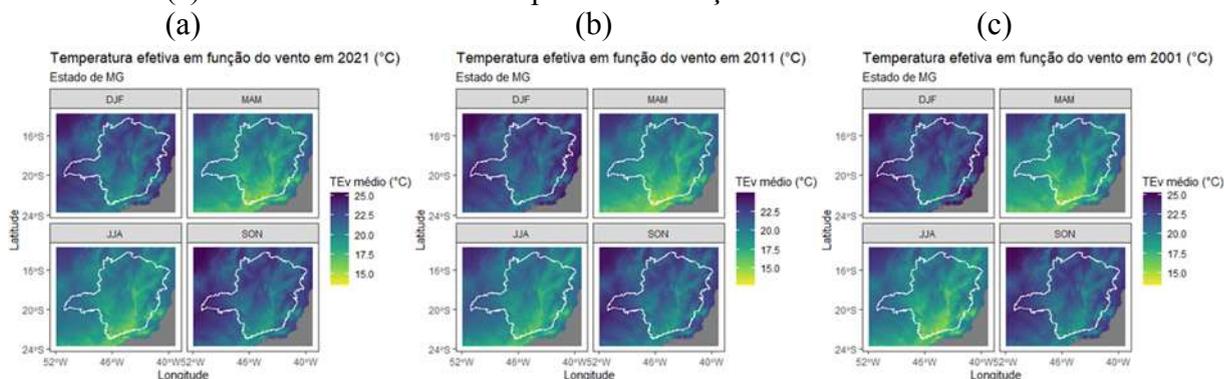
Figura 9 - Temperatura Efetiva em função do vento (TEv) no século XXI em Minas Gerais



Fonte: do Autor (2023)

Da mesma forma como visto nas variáveis anteriores, também foi feita uma análise sazonal, sendo verificada mudanças com o decorrer das estações e dos anos, como pode ser observado a seguir:

Figura 10 - Temperatura Efetiva em função do vento (TEv) nos anos de (a) 2001, (b) 2011 e (c) 2021 em Minas Gerais a partir das estações do ano.



Fonte: do Autor (2023)

Bem como pôde ser observado no ITU, a TEv apresenta mudanças nitidamente observáveis ao se explorar um contexto sazonal. Essa variável também traz uma visão de estresse térmico devido ao frio, principalmente visto na região sul do estado e nas estações mais secas ($TEv < 19 \text{ }^\circ\text{C}$).

Já para situações de desconforto devido ao calor ($TEv > 25 \text{ }^\circ\text{C}$), foram encontrados índices nas mesorregiões do triângulo mineiro, noroeste, norte e vale do rio Doce.

Em todos os índices analisados pôde se verificar locais onde há desconforto térmico dentro do estado de Minas Gerais. Por se tratar de uma região extensa e com diversas variações de clima e altitude, observou-se tanto estresse devido ao frio quanto ao calor demasiado.

6. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados obtidos por meio de equações envolvendo temperatura e umidade relativa, pode-se concluir que foi possível definir índices de conforto térmico para o estado de Minas Gerais, os quais, mesmo que apenas sendo a média de cada mês, puderam representar de forma significativa o que era esperado para cada situação, e também demonstrar situações na área estudada onde há situações de desconforto térmico, seja ele para o excesso de calor ou para frio demasiado.

Sendo esse estudo feito com dados mensais dos anos em questão, faz-se necessário o estudo dos dados de forma diária, podendo-se comparar esses dois tipos de resultados, para se compreender melhor as variações encontradas no dia a dia do estado, podendo-se ainda encontrar uma amplitude ainda maior das variáveis apresentadas neste trabalho, o que prejudica ainda mais o conforto térmico de sua população, referendando ainda mais esse método de cálculo de conforto térmico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas (1961-1990). Brasília, 1992. 84p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 3**, de 28 de junho de 1990 Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR.
- COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Composição e qualidade do ar. Ana; São Paulo: CETESB, 2010. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. Acesso: 20/11/2023.
- COPERNICUS (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.). ERA5-Land Hourly Data from 2001 to Present Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/doi/10.24381/cds.e2161bac>. Acesso em: 07/10/2023
- HERSBACH, H. et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.
- IBGE. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias**. Brasília: IBGE, 2017, Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redesgeograficas/15778-divisoes-regionais-do-brasil.html>>. Acesso em: 20/11/2023.
- IPCC. **Climate Change 2023**: Synthesis Report. p. (35-115), 2023. Disponível em: doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647. Acesso em novembro de 2023
- JARDIM, Carlos Henrique et al. O clima em áreas limítrofes ao planalto meridional do Espinhaço: Belo Horizonte, Sete Lagoas e Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais-Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 25, 2019.
- LEAL, L. R. et al. Análise de Índices de Conforto Térmico Urbano associados às Condições Sinóticas de Vitória (ES), Brasil. **II Encontro Nacional Sobre Reabilitação Urbana e Construção Sustentável**: do edifício para a escala urbana, Lisboa, Novembro de 2017. Disponível em: <https://lpp.ufes.br/sites/lpp.ufes.br/files/field/anexo/analise.pdf>. Acesso em novembro de 2023.
- MARTINI, Angeline; BIONDI, Daniela; BATISTA, Antonio Carlos. Tempo de conforto térmico proporcionado pela arborização de ruas. *Acta Biológica Catarinense*, v. 6, n. 4, p. 5-14, 2019.
- PELOSI, Anna et al. Comparison of ERA5-Land and UERRA MSCAN-SURFEX reanalysis data with spatially interpolated weather observations for the regional assessment of reference evapotranspiration. *Water*, v. 12, n. 6, p. 1669, 2020.

REBOITA, M. S. et al. ASPECTOS Climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 206-225, 2015.

QUEIROZ, Marluce Teixeira Andrade et al. Aspectos da poluição atmosférica: análise da qualidade do ar em Coronel Fabriciano e Timóteo, MG, Brasil. **Revista Gestão Industrial**, v. 16, n. 1, 2020.

REIS, R. J.; ALVES, M. A. S. Climatologia de dias com nuvens de trovoadas em Minas Gerais. **Boletim de Geografia**, v. 34, n. 1, p. 1-12, 2016.

SINSEL, T. et al. Implementation and evaluation of mean radiant temperature schemes in the microclimate model ENVI-met. **Urban Climate**, v. 45, p. 101279, 2022.

SOCI, C. et al. High-resolution precipitation re-analysis system for climatological purposes. **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 68, n. 1, p. 29879, 2016.

SUPING, Z. et al. Study of the relationships between weather conditions and the marathon race, and of meteorotropic effects on distance runners. **International Journal Of Biometeorology**. [s.l.], p. 63-68. nov. 1992.

VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2000. 449 p.

VIEIRA, E. M. A. et al. Comportamento de modelos adaptativos de conforto térmico frente ao modelo de Fanger em intensivistas adaptados ao clima tropical. **Ambiente Construído**, v. 18, p. 479-490, 2018.

WILD, M. Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change**, v. 7, n. 1, p. 91-107, 2016.

WANG, K.; DICKINSON, R. E. Global atmospheric downward longwave radiation at the surface from ground-based observations, satellite retrievals, and reanalyses. **Reviews of Geophysics**, v. 51, n. 2, p. 150-185, 2013.

XAVIER, T. C. et al. Análise comparativa de índices de conforto térmico em Viçosa-MG, Zona da Mata Mineira. **Geo UERJ**, n. 41, p. 54585, 2022.

ZHAO, Q.; LIAN, Z.; LAI, D. Thermal comfort models and their developments: A review. **Energy and Built Environment**, v. 2, n. 1, p. 21-33, 2021.

ZHANG, Y. Dynamic effect analysis of meteorological conditions on air pollution: A case study from Beijing. **Science of the Total Environment**, v. 684, p. 178-185, 2019.