

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**TÚLIO SOUZA MARIANO**

**POTENCIALIDADE DO USO DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO  
EVAPORATIVO EM BOVINOCULTURA LEITEIRA A PARTIR DE ÍNDICES DO  
AMBIENTE TÉRMICO**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2024**

**TÚLIO SOUZA MARIANO**

**POTENCIALIDADE DO USO DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO  
EVAPORATIVO EM BOVINOCULTURA LEITEIRA A PARTIR DE ÍNDICES DO  
AMBIENTE TÉRMICO**

Relatório final apresentado à Universidade Federal  
de Viçosa, como parte das exigências para obtenção  
do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.

Orientador: Flávio Barbosa Justino

Coorientador: Carlos Eduardo Alves Oliveira

**VIÇOSA – MINAS GERAIS**

**2024**


**TÚLIO SOUZA MARIANO**

**POTENCIALIDADE DO USO DE SISTEMAS DE RESFRIAMENTO  
EVAPORATIVO EM BOVINOCULTURA LEITEIRA A PARTIR DE ÍNDICES DO  
AMBIENTE TÉRMICO**

Relatório final apresentado à Universidade Federal  
de Viçosa, como parte das exigências para obtenção  
do título de Engenheiro Agrícola e Ambiental.


APROVADO: 03 de setembro de 2024.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente  
 **TULIO SOUZA MARIANO**  
Data: 13/09/2024 20:12:46-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Tulio Souza Mariano**  
Autor

Documento assinado digitalmente  
 **FLAVIO BARBOSA JUSTINO**  
Data: 14/09/2024 09:07:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

**Flávio Barbosa Justino**  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

À Deus por ter guiado meus caminhos e ter me dado a oportunidade de estudar em uma universidade;

A meus pais, Mauro e Cleidismar, por todo apoio, cuidado e amor durante minha jornada;

A minha irmã Gabriela, por ter sido a primeira pessoa a acreditar em mim e sempre me auxiliar da melhor forma possível;

A meus amigos por terem sido minha família em Viçosa;

A minhas amigas Ana Carolina Sabino e Jocássia Reis por terem me auxiliado na condução do estudo;

Ao doutor Carlos Oliveira por sempre me auxiliar de forma muito generosa em várias atividades projetos da graduação;

Ao professor Flávio Justino por ter me orientado neste trabalho;

A Universidade Federal de Viçosa por tantos ensinamentos e lições de vida;

Às entidades AMBIAGRO, PET e GECRA por terem me dado a oportunidade de crescer como pessoa e profissional;

Muito obrigado!

## RESUMO

MARIANO, Túlio Souza, Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2024. **Potencialidade do uso de sistemas de sistemas de resfriamento evaporativo em bovinocultura leiteira a partir de índices térmicos.** Orientador: Flávio Barbosa Justino. Coorientador: Carlos Eduardo Alves Oliveira.

Na implementação de sistemas de produção de leite especializados, em que há exploração de vacas de alta produção e elevado investimento, é fundamental que sejam realizados estudos de avaliação e caracterização das condições locais. Esses dados são necessários ao projetar instalações para utilizar métodos de acondicionamento térmico capazes de atender a demanda térmica dos animais que serão alojados. Esses estudos, são fundamentais no Brasil, pois em grande parte do território nacional a temperatura de bulbo seco permanece elevada ao longo do ano. Nesse sentido, frequentemente é necessário utilizar técnicas de resfriamento evaporativo corporal dos animais e/ou do ar, uma vez que o estresse térmico por calor é um problema recorrente em bovinos leiteiros de alta produção, animais que normalmente são de origem europeia. Desse modo, objetivou-se nesse estudo avaliar se há potencialidade para uso da técnica de resfriamento evaporativo do ar em sistemas de produção de bovinos leiteiros de alta produção. Para tal avaliação, foram utilizadas duas variáveis que, associadas, são capazes de indicar, sob diferentes proporções, se a utilização de resfriamento evaporativo é necessária, bem como qual a sua capacidade de redução de Carga Térmica Radiante (CTR). Para realização do estudo, foram utilizados dados obtidos de estações meteorológicas automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para os municípios de Uberlândia (MG), Luziânia (GO) e Uruguaiana (RS). Calculou-se o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e foram propostos dois pontos de estado de potencial de uso do resfriamento evaporativo do ar distintos. No ponto de estado 1, a CTR foi calculada com base em dados de temperatura de bulbo seco do ar e velocidade do vento, obtidos a partir das estações meteorológicas automáticas. No ponto de estado 2, a CTR foi calculada simulando condições de ventilação forçada, com velocidade do vento de  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , e utilizando a temperatura que o ar alcançaria caso fosse resfriado a pressão constante. Com base nos pontos de estado 1 e 2, foi calculada a Variação Teórica de Umidade Absoluta ( $\Delta UA$ ). Para o ITU, observou-se que os três municípios apresentavam condições térmicas distintas durante o ano e que o estresse térmico foi mais frequente no período de verão. Em termos médios, o ITU em Uberlândia ( $72,95 \pm 1,00$ ) foi mais elevado, seguido por Luziânia ( $70,40 \pm 0,90$ ) e Uruguaiana ( $66,38 \pm 1,90$ ). Para a Variação Teórica de CTR (CAP), também foi observado tendência de crescimento e decréscimo, sendo observados valores mais baixos nos meses iniciais do ano (Verão) em Uberlândia e Luziânia. No outono, a CAP apresentou

comportamento ascendente até atingir o extremo superior no inverno, cerca de  $97,5 \pm 14,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  e  $96,3 \pm 15,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  em Luziânia e Uberlândia, respectivamente. Em contrapartida, para Uruguaiana observou-se comportamento inverso, com extremo superior de CAP, cerca de  $50,6 \pm 16,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , obtido na primavera. Com base nos resultados de ITU e CAP retratados, constatou-se que, em termos médios, a maior potencialidade de uso de resfriamento evaporativo do ar foi obtida para Uberlândia, em que foi obtido ITU e CAP médios mais elevados, seguido por Luziânia e Uruguaiana. Por fim, a  $\Delta U A$  se mostrou superior em Uberlândia ( $342,2 \pm 78,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), seguido de Luziânia ( $315,1 \pm 73,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) e Uruguaiana ( $199,8 \pm 59,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Palavras-chave: Carga térmica radiante. Variáveis meteorológicas. ITU. ITGU.

## ABSTRACT

MARIANO, Túlio Souza, Federal University of Viçosa, September 2024. **Potential of Using Evaporative Cooling Systems in Dairy Cattle Farming Based on Thermal Indices.** Advisor: Flávio Barbosa Justino. Co-advisor: Carlos Eduardo Alves Oliveira.

In the implementation of specialized dairy production systems, where high-producing cows and substantial investments are involved, it is crucial to conduct studies to evaluate and characterize local conditions. This data is necessary for designing facilities that utilize thermal conditioning methods capable of meeting the thermal demands of the animals to be housed. These studies are fundamental in Brazil because, in much of the national territory, the dry bulb temperature remains high throughout the year. In this context, it is often necessary to use techniques for the evaporative cooling of animals and/or air, as heat stress is a recurring issue in high-producing dairy cattle, which are typically of European origin. Thus, this study aimed to evaluate the potential for using air evaporative cooling techniques in high-producing dairy cattle systems. To assess this, two variables were used that, when combined, can indicate, under different conditions, whether evaporative cooling is necessary and its capacity to reduce Radiant Heat Load (RTL). For the study, data from automatic weather stations of the National Institute of Meteorology (INMET) for the municipalities of Uberlândia (MG), Luziânia (GO), and Uruguaiana (RS) were used. The Temperature and Humidity Index (THI) was calculated, and two distinct potential usage states of air evaporative cooling were proposed. In State 1, the RTL was calculated based on dry bulb temperature and wind speed data obtained from the automatic weather stations. In State 2, the RTL was calculated by simulating forced ventilation conditions with a wind speed of  $2.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  and using the temperature that the air would reach if it were cooled at constant pressure. Based on States 1 and 2, the Theoretical Variation in Absolute Humidity ( $\Delta\text{AH}$ ) was calculated. For the THI, it was observed that the three municipalities had different thermal conditions throughout the year, with heat stress being more frequent in the summer period. On average, THI in Uberlândia ( $72.95 \pm 1.00$ ) was higher, followed by Luziânia ( $70.40 \pm 0.90$ ) and Uruguaiana ( $66.38 \pm 1.90$ ). For the Theoretical Variation in RTL (TRL), a trend of increase and decrease was also observed, with lower values in the early months of the year (summer) in Uberlândia and Luziânia. In autumn, the TRL showed an ascending trend until reaching the upper extreme in winter, about  $97.5 \pm 14.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  and  $96.3 \pm 15.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  in Luziânia and Uberlândia, respectively. In contrast, Uruguaiana showed an inverse pattern, with the upper extreme of TRL, around  $50.6 \pm 16.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , observed in spring. Based on the THI and TRL results, it was found that, on average, the greatest potential for using air evaporative

cooling was found for Uberlândia, which had the highest average THI and TRL, followed by Luziânia and Uruguaiana. Finally,  $\Delta AH$  was higher in Uberlândia ( $342.2 \pm 78.8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), followed by Luziânia ( $315.1 \pm 73.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) and Uruguaiana ( $199.8 \pm 59.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Keywords: Radiant Heat Load. Meteorological variables. ITU. ITGU.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Estresse térmico e zona de termoneutralidade.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Trocas térmicas entre animal e ambiente.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Métodos sensíveis de transferência de calor .....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Métodos latentes de transferência de calor .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3</b>	<b>Índices térmicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4</b>	<b>Sistemas de acondicionamento térmico em instalações para bovinos de leite....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.1</b>	<b>Sistemas de acondicionamento térmico natural .....</b>	<b>19</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Sistemas de acondicionamento térmico artificial. ....</b>	<b>19</b>
<b>2.5</b>	<b>Ventilação em sistemas de confinamento de bovinos leiteiros de alta produção ... .....</b>	<b>20</b>
<b>2.6</b>	<b>Conceitos da psicrometria aplicados a resfriamento evaporativo.....</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>23</b>
<b>3.1</b>	<b>Considerações iniciais de projeto .....</b>	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Seleção dos municípios .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3</b>	<b>Extração e organização da base de dados.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4</b>	<b>Avaliação estatística da base de dados.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5</b>	<b>Estimativa do Índice de Temperatura e Umidade.....</b>	<b>27</b>
<b>3.6</b>	<b>Estimativa da Capacidade Teórica de redução de CTR .....</b>	<b>27</b>
<b>3.6.1</b>	<b>Estimativa da CTR inicial .....</b>	<b>28</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Estimativa da CTR simulada .....</b>	<b>29</b>
<b>3.6.3</b>	<b>Estimativa da CAP da Eficiência .....</b>	<b>29</b>
<b>3.7</b>	<b>Estimativa da Variação de Umidade Absoluta .....</b>	<b>30</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>32</b>
<b>4.1</b>	<b>Avaliação climática da base de dados .....</b>	<b>32</b>
<b>4.2</b>	<b>Avaliação da condição térmica pelo Índice de Temperatura e Umidade .....</b>	<b>34</b>
<b>4.3</b>	<b>Avaliação da Capacidade Teórica de Redução de CTR.....</b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Potencialidade do uso de resfriamento evaporativo pela relação entre o ITU e CAP .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Avaliação da Variação Teórica de Umidade Absoluta (<math>\Delta</math>UA).....</b>	<b>49</b>

<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país considerado propício para o desenvolvimento de atividades agrossilvipastoris, devido ao seu vasto território e à presença de distintas condições climáticas, que favorecem a adaptação de diversas plantas e animais de produção (SUL; SECCO, 2022). Além disso, ocupa a colocação de terceiro maior produtor de leite do mundo, contando com produção média de 34 bilhões de litros por ano (MAPA, 2024). Desse modo, entende-se que o setor de produção de leite no país é consolidado como uma das grandes ramificações do agronegócio, pois tem elevada importância em termos econômicos (DAVDSON et al., 2021).

Do ponto de vista da produção intensiva de leite, é necessário que sejam proporcionadas condições que possibilitem explorar ao máximo a capacidade produtiva de bovinos leiteiros, em termos quantitativos e qualitativos. Assim, faz-se cada vez mais necessário que o setor de produção de leite conte com profissionais capazes de conduzir estudos de viabilidade de uso das tecnologias de acondicionamento térmico disponíveis, interpretar os resultados obtidos e estabelecer as melhores práticas a serem utilizadas, a fim de obter melhores condições de produção (CASTRO JÚNIOR; SILVA, 2021).

Os bovinos são classificados como animais homeotermos, ou seja, realizam trocas térmicas com o ambiente com o objetivo de manter a temperatura corporal relativamente constante (DAVDSON et al., 2021). Como o desempenho produtivo dos animais depende das características ambientais no qual os mesmos são submetidos, foram desenvolvidas as técnicas de acondicionamento térmico, classificadas como naturais ou artificiais (BAÊTA; SOUZA, 2010). As técnicas naturais são caracterizadas pela exploração de aspectos construtivos, como material de cobertura e orientação da construção, a fim de proporcionar uma condição menos estressora no interior da instalação. Entretanto, quando a aplicação desse modelo de acondicionamento não é o suficiente para manter os animais em conforto térmico são aplicadas as técnicas artificiais de acondicionamento térmico, sendo elas a ventilação forçada e o resfriamento evaporativo do ambiente, da superfície da pele animal ou de ambos (TOLEDO; DAHL; DE VRIES, 2022).

É relevante destacar que o bem-estar animal é um fator muito importante nos sistemas de produção de leite, uma vez que a produção de leite é diretamente influenciada pelas condições de bem-estar animal, principalmente pelo conforto térmico. Assim, pode-se afirmar que uma unidade de produção atinge bons níveis de funcionalidade e bem-estar animal, quando as instalações são adequadamente projetadas, construídas e manejadas, sendo capazes de

proporcionar boas condições de acondicionamento térmico ambiental, assegurando que as necessidades térmicas dos animais sejam atendidas (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Apesar da presença de profissionais qualificados para trabalhar com o manejo dos animais, de forma geral, o Brasil é considerado um país de altas temperaturas e alta variabilidade das condições térmicas. Desse modo, nem sempre é possível assegurar o máximo de capacidade de produção de leite, visto que o desempenho produtivo de bovinos leiteiros de alta produção, que normalmente são de origem europeia, pode ser significativamente afetado por variações nas condições climáticas (TOLEDO; DAHL; DE VRIES, 2022). Logo, manter os animais em condições de conforto térmico tem se tornado uma problemática no cenário produtivo atual (CASTRO JÚNIOR; SILVA, 2021; JI et al., 2020; POLSKY; VON-KEYSERLINGK, 2017).

Com base nas condições climáticas predominantes no Brasil, foram desenvolvidas técnicas de acondicionamento térmico artificial, por resfriamento evaporativo do ar e/ou dos animais, que são frequentemente utilizadas nos períodos mais quentes do ano, com objetivo de manter os animais em condições termicamente confortáveis. Diante do exposto, concebeu-se esse estudo, cujo objetivo foi avaliar se há potencialidade para uso da técnica de resfriamento evaporativo do ar e da superfície animal em sistemas de produção de bovinos especializados em produção de leite. Para alcançar esse objetivo, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: i) calcular e avaliar o Índice de Temperatura e Umidade (ITU); determinar a Capacidade Teórica de Redução de Carga Térmica Radiante (CAP) e sua associação com o ITU, de forma que seja possível identificar e quantificar a potencialidade do uso de resfriamento evaporativo; e (iii) determinar da Variação Teórica de Umidade Absoluta ( $\Delta U A$ ).

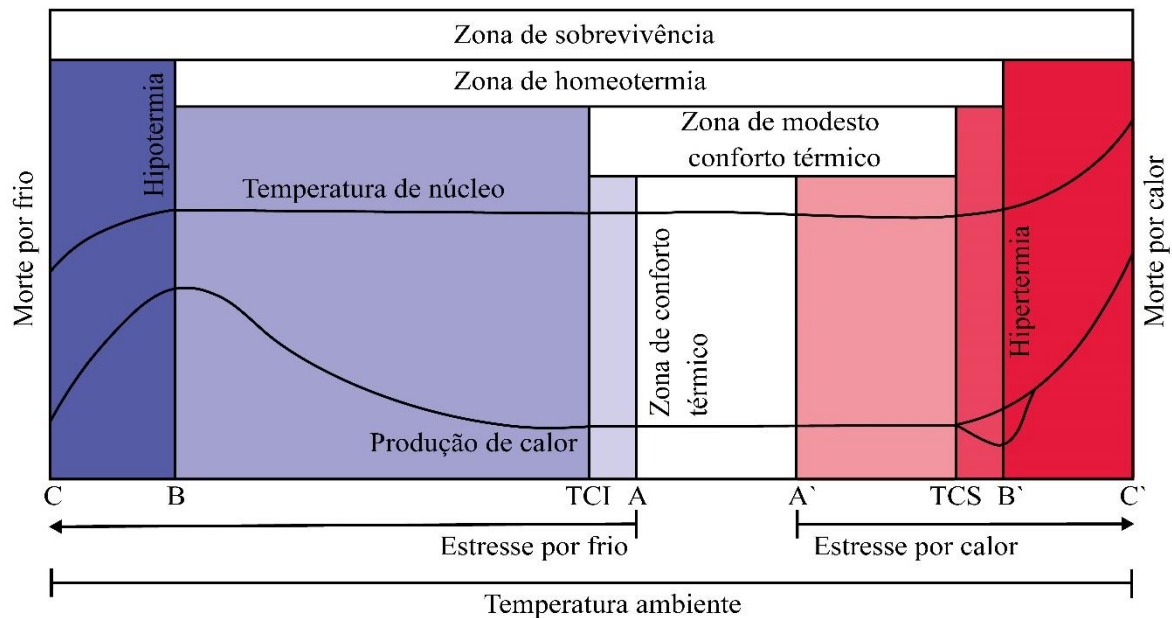
## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Estresse térmico e zona de termoneutralidade**

A termorregulação se trata do somatório de uma série de sistemas reguladores que animais possuem com o objetivo de manter a temperatura corporal relativamente constante (CASTRO JÚNIOR; SILVA, 2021). Os animais capazes de realizar tal processo são definidos como homeotermos e os mesmos são dotados de uma série de características fisiológicas e comportamentais capazes de proporcionar a dissipação de calor de forma sensível ou latente (DAVDSON et al., 2021). Entretanto, apesar da existência de tais agentes termorreguladores, condições ambientais desfavoráveis podem acarretar uma série de consequências negativas para os animais e para a produção leiteira propriamente dita (DAVDSON et al., 2021).

Animais sob condição de estresse térmico por altas temperaturas tendem a alterar seus hábitos alimentares, aumentar o consumo de água, buscar por regiões mais sombreadas, ter seu crescimento retardado e diminuir a produção de leite (BAÊTA; SOUZA, 2010). Além disso, podem sofrer alterações fisiológicas relacionadas ao balanço entre ácidos e bases no sistema digestivo, e a sua concentração hormonal tende a variar consideravelmente nos períodos mais quentes (KIC, 2022). Apesar das diversas consequências, os animais possuem mecanismos que objetivam a termorregulação da temperatura corporal, que podem variar em eficiência de acordo com suas características genéticas (TOLEDO; DAHL; DE VRIES, 2022). O comportamento da variação de temperatura de núcleo e da produção para diferentes condições de temperatura ambiente estão ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Representação das zonas de estado térmico animal em função da temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de Baêta; Souza (2010).

Apesar da existência de sistemas que auxiliam o animal na termorregulação, por meio da análise da Figura 1 fica explícito que há limites de temperatura utilizados como indicadores da presença de condições estressoras. Sob tal perspectiva, destaca-se ser necessário analisar o comportamento das variáveis térmicas e comportamentais de animais homeotérmicos de maneira associada às variações de temperatura ambiente (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Na zona de conforto térmico, delimitada pelos pontos A e A', é notória a constância da temperatura de núcleo e de produção de calor sob certa faixa de temperatura ambiente. Em tal cenário, não é identificada a presença da sensação de calor ou frio, sendo possível afirmar que tal condição é a considerada a mais indicada no interior de um sistema de confinamento (BAÊTA; SOUZA, 2010).

O estado de modesto estresse térmico é observado quando a temperatura ambiente tende a temperatura crítica superior (TCS) e ou a temperatura crítica inferior (TCI). Nesse cenário, o animal começa a utilizar sistemas termorreguladores de aquecimento ou resfriamento para manutenção da temperatura corporal (MADER; DAVIS; BROWN-BRANDL, 2006; POLSY; VON-KEYSERLINGK, 2017). Entretanto, confinar animais em condição de modesto conforto térmico ainda é considerada aceitável, uma vez que, não são identificadas variações consideráveis de temperatura de núcleo e produção de calor (BAÊTA; SOUZA, 2010).

A zona de homeotermia, delimitada pelos pontos B e B' engloba as zonas já supracitadas com a implementação de zonas de estresse, em que a de temperatura de núcleo e a produção de calor varia consideravelmente em função da temperatura ambiente. Por fim, nas zonas de hipotermia e hipertermia são observadas variações mais protuberantes de temperatura de núcleo e produção de calor. Em alguns casos, quando homeotermos estão submetidos a zona de hipotermia ou hipertermia e não são tomadas medidas para mitigar o estresse por calor ou por frio o desconforto animal pode atingir limites extremos causando a morte (Ponto C e C')(MADER; DAVIS; BROWN-BRANDL, 2006; POLSY; VON-KEYSERLINGK, 2017).

Certamente, quando o animal necessita utilizar parte de sua energia metabólica para regulação da temperatura corporal, a capacidade produtiva também é diretamente afetada (ARIAS; MADER, 2023; RENAUDEAU et al., 2012; YAN et al., 2022). Em países como o Brasil, em que há presença de climas equatorial, tropical e temperado, conforme a classificação de Köppen-Geiger, é extremamente difícil para o animal se manter em homeostase durante todos os meses do ano (BAËTA; SOUZA, 2010). Cabe destacar que em maior parte dos municípios é observada a prevalência de temperaturas elevadas durante o dia, apesar da variedade climática nacional. Portanto, o estresse térmico por calor se destaca como um dos principais desafios a serem combatidos, já que elementos meteorológicos como temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento são capazes impactar diretamente a produção leiteira (PANTOJA et al., 2023).

## **2.2 Trocas térmicas entre animal e ambiente**

Em uma unidade de produção animal os animais constantemente realizam trocas térmicas com o meio. Desse modo, podem ser mencionadas duas classificações de métodos de transferência de calor, as formas sensíveis e latentes (BAËTA; SOUZA, 2010).

### **2.2.1 Métodos sensíveis de transferência de calor**

As trocas térmicas por métodos sensíveis são divididas em 3 grupos: trocas condutivas; trocas convectivas; e trocas por irradiação (CLAUS BORGNAKKE, 2013). O processo de condução ocorre quando dois ou mais corpos de diferentes temperaturas entram em contato, formando um gradiente térmico, fazendo com que o calor flua dos corpos de maior energia térmica (maior temperatura) para os de menor energia térmica (menor temperatura)(CLAUS

BORGNAKKE, 2013). Para a ocorrência de trocas térmicas por condução, é necessário apenas que os corpos envolvidos estejam em contato e possuam temperaturas distintas. A velocidade, a magnitude e as consequências dessas trocas de calor variam de acordo com as características dos corpos envolvidos, tais como condutibilidade térmica e diferença de temperatura (BAËTA; SOUZA, 2010). Vale ressaltar que, com o decorrer dos anos e com a evolução nas pesquisas relacionadas a ambiência animal e sistemas de confinamento, foram desenvolvidos materiais de construção que são capazes de promover maior isolamento térmico, como resultado da diminuição das taxas de transferência de calor por condução. Um exemplo do uso dessa tecnologia é a inserção de materiais com menor condutividade térmica em construções, como ocorre em painéis aglomerados à base de subprodutos vegetais e as telhas termoacústicas (MAHIEU et al., 2021).

Outro método de transferência de calor sensível é a convecção, que se trata da movimentação ascendente ou descendente de um fluido, em função do grau de agitação molecular (CLAUS BORGNAKKE, 2013). Fluidos com maior energia térmica tendem a ter comportamentos de expansão e menor densidade, tomando trajetórias ascendentes. Já fluidos de menor temperatura, por terem baixo grau de agitação molecular, costumam ser mais densos e possuírem fluxo descendente de movimentação. Um exemplo de característica construtiva associada à convecção é a presença de aberturas nas terças cumeeiras, denominadas lanternins. Quando ocorrem trocas térmicas entre a pele do animal e o fluido, que percorre sua superfície corporal, o ar absorve calor e tende a se tornar mais quente e menos denso, realizando movimentações ascendentes, até atingir a região mais elevada de galpões, e sair pelos lanternins (CLAUS BORGNAKKE, 2013).

Outro método sensível de transferência de calor extremamente importante é a radiação, que ocorre devido a emissão de energia através de ondas eletromagnéticas entre corpos que possuem variação de temperatura. Tais ondas são geradas porque parte da energia interna molecular é convertida em energia radiante, proporcionando variação de temperatura no corpo (CLAUS BORGNAKKE, 2013).

Em unidades de produção, que utilizam bovinos leiteiros de origem europeia, a radiação solar é um dos principais responsáveis pela emissão de ondas eletromagnéticas e, portanto, é de suma importância utilizar estruturas de cobertura para impedir que a radiação solar acometa de forma direta a superfície da pele animal. Quando animais são alojados em sistemas de confinamento sem cobertura e com prevalência de elevadas temperaturas, em que o estresse térmico por calor é recorrente, a radiação solar promove alterações comportamentais e fisiológicas que afetam diretamente o sistema produtivo. Sob tais circunstâncias, pode ser

observada redução no consumo de alimentos por parte do animal, e seus ciclos produtivos tendem a ser menos eficientes (HIDALGO et al., 2022).

### **2.2.2 Métodos latentes de transferência de calor**

Os métodos latentes de transferência de calor são evaporação e condensação, nos quais os fluxos ocorrem devido a formação de gradientes de pressão de vapor. Esses métodos são acionados quando o animal encontra-se em uma condição térmica desfavorável, em que seu corpo percebe a condição de estresse e ativa agentes termorreguladores corporais (BAÊTA; SOUZA, 2010). Os processos de transferência de calor latente se iniciam com o transporte de água das regiões mais internas do corpo animal até a epiderme. As glândulas sudoríparas se contraem em função de estímulos periféricos e temperatura hipotalâmica e secretam suor na superfície da pele animal. O objetivo dessa umidificação metabólica da superfície animal é proporcionar uma condição de gradiente de vapor, sendo que por meio da alteração do estado físico do suor, de líquido para vapor, ocorre absorção de calor da pele do animal. Entretanto, um ponto que deve ser mencionado é que as taxas de evaporação dependem de forma direta da umidade relativa do ar, visto que, quanto maior o grau de saturação, menor a capacidade de evaporação da água que se encontra na superfície do animal (FOROUDHANI; AMON, 2022).

Sob condições mais severas ocorre um maior fluxo de sangue do núcleo para a pele do animal, fazendo com sejam identificadas maiores taxas de transferência de calor e, conseqüentemente, o aumento da temperatura na superfície corporal. Após o aumento dessa perda de calor por evaporação o sangue que circula o corpo animal se torna menos aquecido (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Além dos processos de transferência de calor latente pela superfície da pele animal, também podem ser citadas as trocas evaporativas que envolvem a respiração. Sob condição estressora ocorre o aumento da frequência respiratória e as massas de ar que adentram as vias respiratórias do animal tendem a aumentar. A partir disso, ocorrem processos de aquecimento e resfriamento do ar no interior do sistema respiratório do animal. Quando o ar é inspirado sua temperatura se eleva até a temperatura corporal, se tornando saturado. Posteriormente, quando o ar saturado aquecido é removido pela expiração o mesmo perde calor através da mucosa resfriada pela inspiração, proporcionando condensação e perda de calor latente (PANTOJA et al., 2023).

### 2.3 Índices térmicos

A avaliação das condições térmico-ambientais pode ser realizada considerando uma série de fatores que influenciam diretamente nas trocas térmicas entre animais e meio. Variáveis como temperatura de bulbo seco do ar ( $T_{bs}$ ), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento ( $V_v$ ) e radiação solar influenciam nas condições ambientais e na necessidade do acondicionamento térmico artificial. Nesse sentido, foram propostos diversos índices térmicos, que objetivam quantificar e avaliar a condição ambiente em função de variáveis meteorológicas e/ou medições realizadas no animal propriamente dito (KIC, 2022).

O Índice de Temperatura e Umidade (ITU) foi um dos primeiros índices desenvolvidos para avaliação das condições térmico-ambientais. Tal índice foi idealizado por Thom (1958) e estabelece escalas que indicam se o ambiente está ou não termicamente confortável, com base na combinação de leituras de  $T_{bs}$  e UR. Com o passar do tempo, os estudos em ambiência animal foram sendo aprimorados e foram desenvolvidas variações do ITU proposto por Thom (1959), visando descrever com maior eficiência o ambiente térmico para diferentes animais, condições climáticas e fases produtivas (DIKMEN; HANSEN, 2009; GAULY; AMMER, 2020). Dentre essas variações, destaca-se a proposição de Armstrong (1994) que estima o ITU por meio da Equação 1.

$$ITU = (0,8 \times T_{bs}) + \left[ \frac{UR \times (T_{bs} - 14,4)}{100} \right] + 46,4 \quad (1)$$

Em que:  $T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar, em °C;

$UR$  é a umidade relativa do ar, em %.

A determinação do estado térmico ao qual o animal está submetido pode ser realizada por meio dos intervalos obtidos pelo cálculo do ITU. Para bovinos leiteiros de alta produção, é reconhecido que valores superiores a 70 indicam a existência de estresse térmico, que valores são superiores a 72 configura estado de “perigo”, e que valores acima de 78 configuram situação de emergência (ARMSTRONG, 1994).

A partir do ITU, D. E. Buffington et al., (1981) desenvolveram outro índice capaz de avaliar a condição térmica ambiental, denominado Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU). A principal distinção desse índice em relação ao ITU é o fato de considerar a radiação térmica, sendo mais eficiente em condições de exposição animal à ambientes abertos e

pastagens (BAËTA; SOUZA, 2010; GAULY; AMMER, 2020). A determinação do ITGU pode ser realizada por meio da Equação 2 (D. E. BUFFINGTON et al., 1981).

$$ITGU = 0,72 \times (T_{gn} + T_{bu}) + 40,6 \quad (2)$$

Em que:  $T_{gn}$  é a temperatura de globo negro, em °C;

$T_{bu}$  é a temperatura de bulbo úmido do ar, em °C.

Na formulação do ITGU por D. E. Buffington et al., (1981) também foram estabelecidos intervalos que classificam o estado térmico animal. Para bovinos de leite, quando são determinados valores inferiores a 74 tem-se condições consideradas de conforto térmico, valores entre 74 e 79 são considerados como estresse térmico leve, e valores acima de 79 indicam condições de alerta.

Vale ressaltar que existem uma série de outros índices utilizados para avaliação da condição térmica dos animais. Dentre esses, destaca-se a Carga Térmica Radiante (CTR), que busca mensurar a energia térmica irradiada para um corpo em todas as direções, levando em consideração  $T_{bs}$  e  $V_v$  (MAGALHÃES et al., 2020). A quantificação de radiação trocada é feita com uma temperatura denominada Temperatura Radiante Média (TRM). A TRM pode ser determinada utilizando a Equação 3, proposta por Esmay (1982).

$$TRM = 100 \times \sqrt[4]{(2,51 \times \sqrt{V_v} \times (T_{gn} - T_{bs}) + \left(\frac{T_{gn}}{100}\right)^4} \quad (3)$$

Em que:  $TRM$  é a Temperatura Radiante Média, em K;

$V_v$  é a velocidade do vento, em  $m \cdot s^{-1}$ ;

$T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar, em K;

$T_{gn}$  é a temperatura de globo negro, em K.

De posse da TRM, é possível quantificar o somatório das energias que estão sendo transferidas. Tal somatório é definido como CTR, calculada por meio da Equação 4 (ESMAY, 1982).

$$CTR = \sigma \times (TRM)^4 \quad (4)$$

Em que:  $CTR$  é a Carga Térmica Radiante, em  $W \cdot m^{-2}$ ;

$\sigma$  é a Constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \cdot W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ ) e

$TRM$  é a temperatura radiante média, em K.

## **2.4 Sistemas de acondicionamento térmico em instalações para bovinos de leite**

Com base nas características fisiológicas de vacas leiteiras de alta produção e na conjuntura climática do Brasil, entende-se que é necessário explorar as diversas formas de acondicionamento térmico do ambiente. Sendo possível que tal acondicionamento seja realizado de forma natural (por meio de aspectos construtivos) e de forma artificial (por meio do uso de ventilação forçada e resfriamento evaporativo do ar e dos animais (BAÊTA; SOUZA, 2010).

### **2.4.1 Sistemas de acondicionamento térmico natural**

As formas de acondicionamento térmico natural consistem na exploração da concepção arquitetônica e das características construtivas da instalação, como escolha do local de construção e orientação do eixo longitudinal da instalação que, desde que adequadamente realizados, minimizam os efeitos de radiação solar e a elevação do pé-direito de instalações abertas, que estimula a circulação natural de ar (BAÊTA; SOUZA, 2010).

Tais técnicas são alternativas interessantes em instalações abertas e apresentam efeitos positivos no acondicionamento térmico ambiental (BARN et al., 2022). Todavia, nem sempre a exploração desses aspectos construtivos é suficiente para proporcionar o acondicionamento térmico necessário (GARCIA, 2017).

### **2.4.2 Sistemas de acondicionamento térmico artificial.**

As técnicas artificiais de acondicionamento térmico, ventilação forçada e resfriamento evaporativo, são utilizadas como complementação do melhoramento da condição térmica em uma instalação animal (BAÊTA; SOUZA, 2010). A ventilação forçada é conduzida pelo uso de ventiladores ou exaustores que visam manter os padrões de qualidade de ar e manter a temperatura ambiente em níveis adequados. Além disso, a mesma é utilizada para redução de gases tóxicos e na renovação do ar (REUSCHER et al., 2024).

O resfriamento evaporativo consiste na utilização de água como elemento refrigerante, uma vez que a mesma atua com eficiência na refrigeração devido a sua elevada capacidade calorífica e alto calor latente de vaporização, podendo ser utilizada para resfriar o ar, os animais ou ambos (FERREIRA et al., 2006). O resfriamento corporal dos animais pode ser realizado com aspersão de água sobre seus corpos, por meio de gotas com diâmetro entre 15 e 50  $\mu\text{m}$ , capazes de molhar a pele dos animais (FOURNEL; OUELLET; CHARBONNEAU, 2017). Entretanto, tal método deve ser utilizado sob condição de ventilação forçada e em localidades do sistema produtivo em que a aspersão não cause problemas em termos de sanidade e manejo, (GARCIA, 2017). Nesse contexto a ventilação forçada possui a função de reposição das camadas de ar saturada na superfície da pele do animal, uma vez que, caso o animal seja molhado e esteja envolvido por ar saturado, as trocas térmicas latentes não ocorrerão de forma eficiente e o resfriamento ficará deficiente em termos de evaporação (FOROUSHANI; AMON, 2022).

Já o resfriamento evaporativo do ar também pode alterar de forma significativa as condições do ambiente interno da instalação. Nesse caso, podem ser utilizados sistemas de nebulização de água, associados à ventilação mecânica por pressão positiva, ou sistemas de placas de celulose umedecidas associadas com ventilação mecânica por pressão negativa, cujo uso deve ser feito exclusivamente em sistemas *Compost Barn* e *Free Stall* totalmente fechados (ANDRADE et al., 2024).

No resfriamento evaporativo por molhamento superficial, há formação de gradiente de pressão de vapor que flui do meio de maior temperatura (animal) para o meio de menor temperatura (gotículas de água presentes na pele). Para que a gotícula sofra alteração de estado físico é necessário que uma quantidade de calor, referente ao calor latente de vaporização, seja absorvida da superfície do animal. Devido a esse gradiente a energia térmica tende a ser transferida da pele para a água, favorecendo a transferência de calor (BAËTA; SOUZA, 2010).

## **2.5 Ventilação em sistemas de confinamento de bovinos leiteiros de alta produção**

O controle das variáveis relacionadas a ambiência animal é de suma importância em sistemas de confinamento de bovinos leiteiros que buscam otimizar seus processos e aumentar a produção. Dessa maneira, estudos relacionados à ventilação no interior de instalações, englobando diferentes faixas de  $V_v$ , diversas localidades e tipologias de confinamento, estão disponíveis na literatura (TOLEDO; DAHL; DVRIES, 2022).

Segundo Hahn (1982), a  $V_v$  ideal no interior de um sistema de confinamento de bovinos leiteiros é de aproximadamente  $2,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Posteriormente, Black et al., (2013) concluíram que, em sistemas do tipo *Compost Barn*, quando  $V_v$  é mantida em torno de  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , há adequada secagem da cama e alta eficiência de remoção de gases. Além disso, estudos recentes concluem que  $V_v$  varia de acordo com a distância vertical que o ponto de medição se localiza tomando como referencial o piso (BLACK et al., 2013; PANTOJA et al., 2023; REUSCHER et al., 2023). No estudo conduzido por Pantoja et al. (2023), foram coletadas diferentes  $V_v$  em um sistema *Compost Barn* aberto, com uso de ventilação forçada, em uma altura de 1,5 m em relação à cama ( $V_{1,5}$ ) e na altura da cama ( $V_0$ ). Para os períodos de inverno, foi observado que os valores de  $V_{1,5}$ , nos períodos manhã e tarde, variavam de  $1,45 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $1,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , enquanto para  $V_0$  foram identificados valores entre  $1,50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $1,60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Além disso, Pantoja et al. (2023) observaram que a distribuição da variável na área de cama era heterogênea e apresentou amplitudes de variação em torno de  $2,70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Vale ressaltar que estudos relacionados à ventilação natural em instalações abertas podem ser realizados utilizando Fluidodinâmica Computacional (CFD). Na pesquisa conduzida por Damasceno et al. (2020), foram realizadas simulações em 4 direções de vento em uma instalação do tipo *Compost Barn* aberta, com uso de ventilação natural, utilizando modelos em escala reduzida, com dimensões de 1,35 m de comprimento, 1,20 m de largura e 0,27 m de altura de beiral. Com base nos resultados alcançados, foram observadas velocidades mínimas e médias máximas de  $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  e  $1,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , respectivamente. Entretanto, tais valores variavam de acordo com a direção do vento e com o ponto em que a  $V_v$  foi coletada, em relação à altura de piso.

Estudos relacionados à ventilação também são realizados em outros sistemas de confinamento. Um exemplo é o estudo conduzido por Reuscher et al (2023), em que foram percebidos os efeitos de diferentes  $V_v$  a altura de repouso em um sistema do tipo *Free Stall*. O estudo foi conduzido em 2020, no período de verão, em uma instalação *Free Stall* de ventilação natural no Centro de Pesquisa de Gado Leiteiro Emmons Blaine da Universidade de Wisconsin-Madison (UW-Madison), localizado em Arlington, Wisconsin. Cada baía individual era dotada de dois ventiladores com circulação variável, e foram observadas  $V_v$  em condições em que a ventilação natural era complementada com a ventilação mecânica na rotação máxima e apenas com uso de ventilação natural. Reuscher et al (2023) observaram que com 100 % da capacidade dos ventiladores foram obtidas  $V_v$  de  $2,4 \pm 0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a altura de descanso (0,5 m) e uma  $V_v$  de  $3,9 \pm 1,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a altura da vaca em pé (1,5 m). No que tange ao uso apenas de ventilação natural

foi observado que a  $V_v$  variou de  $0,4 \pm 0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a altura de descanso e  $0,5 \pm 0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a altura da vaca em pé.

## 2.6 Conceitos da psicrometria aplicados a resfriamento evaporativo

A psicrometria se trata do estudo das propriedades termodinâmicas do ar, submetido a variações de ponto de estado, decorrentes de processos de secagem, umidificação, resfriamento e aquecimento. Diante disso, propriedades como volume específico, entalpia, temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade absoluta e umidade relativa são amplamente relacionadas e associadas a condições específicas de uma mistura (SIMÕES-MOREIRA; NETO, 2019).

Em relação às diferentes quantificações de umidade, a umidade absoluta consiste na massa de vapor d'água presente em uma porção de ar atmosférico ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Já a umidade específica consiste na massa de vapor d'água contida em uma unidade de massa de ar ( $\text{Kg}_{(\text{vapor})}\cdot\text{Kg}_{(\text{ar})}^{-1}$ ). Por outro lado, a razão de mistura consiste na relação entre massa de vapor d'água em uma amostra de ar e a massa de ar seco contida nessa mesma amostra ( $\text{Kg}_{(\text{vapor})}\cdot\text{Kg}_{(\text{ar seco})}^{-1}$ ) (VIANELLO; ALVES, 2012). A umidade relativa é definida como a relação entre a razão de mistura presente no ar e a razão de mistura desse mesmo ar caso seja submetido a saturação. A temperatura nesse caso é constante e essa umidade relativa é calculada em porcentagem (VIANELLO; ALVES, 2012).

Em termos de técnicas de resfriamento existem diversas maneiras de levar um determinado volume de ar, com  $T_{bs}$  e UR iniciais, ao estado de saturação. A adição de vapor de água na mistura eleva a UR e faz com que o ar se aproxime do ponto de saturação. Esse processo também pode ser realizado por meio da redução da temperatura, fazendo com que UR aumente. Ambos os processos podem ser aplicados separadamente ou em conjunto (VIANELLO; ALVES, 2012). Além disso, a saturação do ar também pode ser alcançada por meio de uma terceira metodologia, que consiste no resfriamento do ar à pressão constante e sem adição de vapor, denominado resfriamento isobárico (VAREJÃO-SILVA, 2006).

Por fim, um conceito que deve ser mencionado é o de temperatura de ponto de orvalho ( $T_{po}$ ). Tal variável consiste na temperatura em que o vapor d'água do ar atmosférico é convertido a pequenas gotículas denominadas orvalho, provenientes da condensação. Essa condição ocorre quando a mistura entre vapor e ar atinge o estado de saturação via resfriamento do tipo isobárico (VIANELLO; ALVES, 2012).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

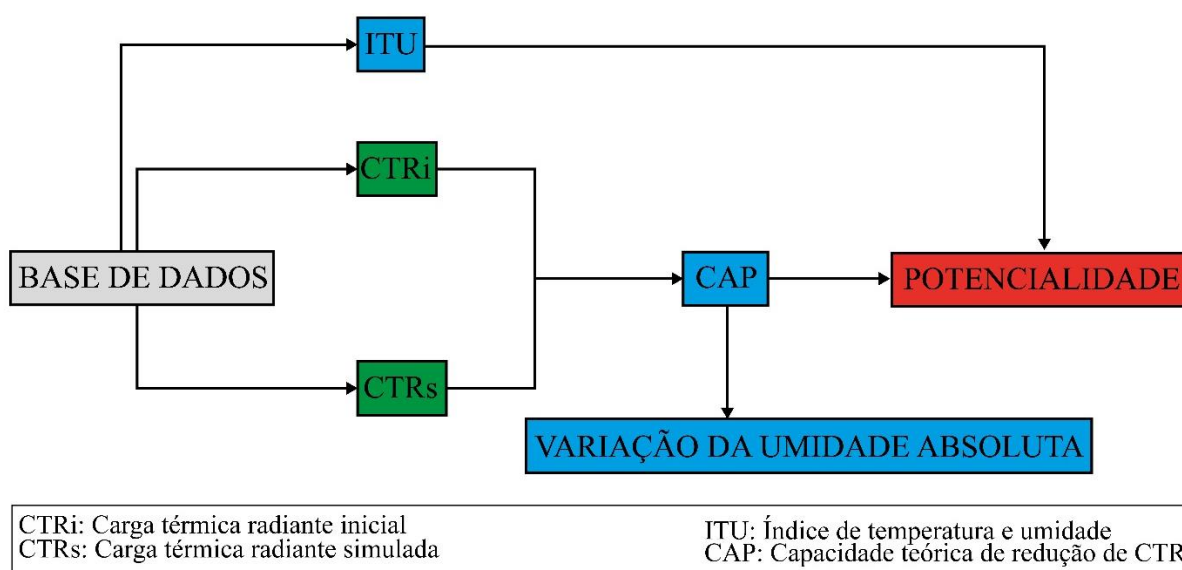
#### 3.1 Considerações iniciais de projeto

Com o auxílio de dados médios de temperatura de bulbo seco do ar ( $T_{bs}$ ), temperatura de ponto de orvalho do ar ( $T_{po}$ ), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento ( $V_v$ ) extraídos de estações meteorológicas automáticas, foi determinado o ITU mensal. Posteriormente, foi calculada a Carga Térmica Radiante Inicial (CTR<sub>i</sub>) e a Carga Térmica Radiante Simulada (CTR<sub>sim</sub>), que caracterizam as condições antes e durante a utilização do resfriamento evaporativo do ar e dos animais. Por fim, foi calculada a Variação Teórica de CTR (CAP) e a Variação de Umidade Absoluta de ( $\Delta UA$ ). Para que isso fosse possível, algumas considerações e observações iniciais foram estabelecidas.

- Todos os processos de transferência de calor ocorreram de forma adiabática;
- As perdas de calor por evaporação não foram computadas no cálculo da CTR;
- No período mais quentes do dia, os dados mensais utilizados foram as médias de dados horários;
- A pressão atmosférica era constante durante o resfriamento.

Com base nas considerações realizadas, os passos que foram necessários para condução do estudo em questão estão ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma das relações entre as variáveis e índices para determinação da potencialidade do uso de resfriamento evaporativo em bovinos leiteiros de alta produção



Fonte: Autores.

### 3.2 Seleção dos municípios

Os dados meteorológicos utilizados foram extraídos das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2024). Desse modo, o primeiro critério de escolha foi a presença de estações meteorológicas automáticas desde o ano de 2007. Vale ressaltar que, do ponto de vista de estatística descritiva, a abundância de dados resulta em resultados mais reais (AZEVEDO, 2016). Logo, como não são todos os municípios que possuem monitoramento meteorológico automático por grandes períodos, entendeu-se que a seleção de bases de dados horários de um intervalo de tempo, iniciando no ano de 2007 e finalizando no ano de 2023, tornaram possível a elaboração de séries temporais de 16 anos, capazes de representar de forma eficiente a condição climática local.

O segundo critério de escolha dos locais de estudo foi a região e a influência que seu estado representa para produção leiteira nacional. Por meio da utilização de dados extraídos de municípios distantes entre si, entendeu-se ser possível avaliar e comparar as diferentes faixas de potencialidade de uso de resfriamento evaporativo do ar e dos animais e relacionar tais resultados com as características climáticas do local. Além disso, entendeu-se ser necessário escolher localidades com elevado volume de produção de leite.

Com base nos critérios de escolha de locais para obtenção dos dados utilizados para realização do estudo, foram escolhidos os municípios de Uruguaiana (RS), Uberlândia (MG) e Luziânia (GO). Na Tabela 1 estão listados dados de produção total anual de leite nesses municípios, dados estes que foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Tabela 1 - Municípios pertencentes a grandes regiões produtoras de leite do cenário nacional

<b>Município</b>	<b>Produção de leite anual (Mil Reais)</b>
Uruguaiana (RS)	1.080
Uberlândia (MG)	199.714
Luziânia (GO)	138.315

Fonte: Adaptada de IBGE (2022).

### 3.3 Extração e organização da base de dados

Após a escolha dos municípios foram obtidas séries temporais horárias no período de 2007 a 2023, por meio do banco de dados do INMET. Das bases de dados do INMET, foram extraídos arquivos do tipo CSV contendo dados horários de temperatura de bulbo seco do ar máxima ( $T_{bs-Máx}$ ), temperatura de bulbo seco do ar mínima ( $T_{bs-Mín}$ ), temperatura de ponto de orvalho máxima ( $T_{po-Máx}$ ), temperatura de ponto de orvalho mínima ( $T_{po-Mín}$ ), Vv e UR. Posteriormente, as temperaturas de bulbo seco do ar e de ponto de orvalho médias foram calculadas utilizando os valores máximos e mínimos destas variáveis. Os cálculos de tais temperaturas médias foram realizados por meio das Equações 5 e 6.

$$T_{bs} = \frac{T_{bs-Máx} + T_{bs-Mín}}{2} \quad (5)$$

Em que:  $T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar média horária, em °C;

$T_{bs-Máx}$  é a temperatura de bulbo seco do ar máximas, em °C e

$T_{bs-Mín}$  é a temperaturas de bulbo seco do ar mínimas, em °C.

$$T_{PO} = \frac{T_{po máx} + T_{po mín}}{2} \quad (6)$$

Em que:  $T_{PO}$  é a temperatura do ponto de orvalho média horária, em °C;

$T_{PO-Máx}$  é a temperatura do ponto de orvalho máxima, em °C; e

$T_{PO-Mín}$  é a temperatura do ponto de orvalho mínima, em °C.

Cabe destacar que as estações meteorológicas automáticas são dotadas de abrigos meteorológicos e normalmente são inseridas em localidades com baixa ou nenhuma influência de construções ao redor. Logo, os dados de Vv obtidos pelas mesmas não necessariamente representam uma condição de Vv similar ao interior do sistema de confinamento. Sob tal perspectiva e com o auxílio do *software RStudio*, foi desenvolvido um código capaz de filtrar todos os dados e selecionar somente linhas dos arquivos CSV em que a Vv é inferior ou igual a  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Posteriormente, o código foi capaz de filtrar os dados que compreendem apenas o intervalo de 10:00 h às 17:00 h, que apresentam as maiores temperaturas de um dia, e calcular

as médias diárias para todas as variáveis. Em seguida, as médias diárias foram convertidas em mensais e novos arquivos do tipo CSV foram gerados.

### 3.4 Avaliação estatística da base de dados

Após a manipulação e organização dos dados de temperatura, umidade e velocidade do vento para os municípios de Uruguaiana (RS), Uberlândia (MG) e Luziânia (GO) foi aplicado o teste “*t Student*” para verificação se existência de significância estatística entre as séries temporais (GRITSENKO; NIKULIN, 1996). Assim, foram realizadas cerca de 9 análises (3 para cada variável) sendo Uberlândia combinada a Luziânia, Uberlândia combinada a Uruguaiana e Luziânia combinada a Uruguaiana. Desse modo, foi necessária a determinação da variância combinada para uma mesma variável e duas bases de dados (Equação 7) (GRITSENKO; NIKULIN, 1996).

$$Sx_1 - x_2 = \sqrt{\frac{((N_1 \times s_1^2) + (N_2 \times s_2^2)) \times (N_1 + N_2)}{(N_1 + N_1 - 2) \times N_1 \times N_2}} \quad (7)$$

Em que:  $Sx_1 - x_2$  é a variância combinada para duas bases de dados, 1 e 2;

$s_1^2$  é a variância da base de dados 1;

$s_2^2$  é a variância da base de dados 2;

$N_1$  é o número de indivíduos da base de dados 1;

$N_2$  é o número de indivíduos da base de dados 2;

Após a estimativa da variância combinada, foi calculado o valor do  $t_{observado}$  pela Equação 8 (GRITSENKO; NIKULIN, 1996).

$$t_{observado} = \frac{X_1 - X_2}{Sx_1 - x_2} \quad (8)$$

Em que:  $X_1$  é a média da base de dados 1;

$X_2$  é a média da base de dados 2;

$Sx_1 - x_2$  é a variância combinada para duas bases de dados, 1 e 2;

Posteriormente, fez-se necessário a determinação dos graus de liberdade ( $gl$ ) e a mesma foi conduzida pela Equação 9 (GRITSENKO; NIKULIN, 1996).

$$gl = N_1 + N_1 - 2 \quad (9)$$

Em que:  $N_1$  é o número de indivíduos da base de dados 1;

$N_2$  é o número de indivíduos da base de dados 2.

Após a determinação dos graus de liberdade e do  $t_{observado}$  a verificação da presença de significância estatística foi conduzida por meio da comparação entre o  $t_{observado}$  e o  $t_{tabelado}$  em função dos graus de liberdade (FÁVERO, 2017). Desse modo, se o  $t_{tabelado} \geq t_{observado} \geq -t_{tabelado}$  é identificada a presença de significância estatística. Em contrapartida, se  $t_{tabelado} < t_{observado} < -t_{tabelado}$  não é identificada a presença de significância estatística (GRITSENKO; NIKULIN, 1996).

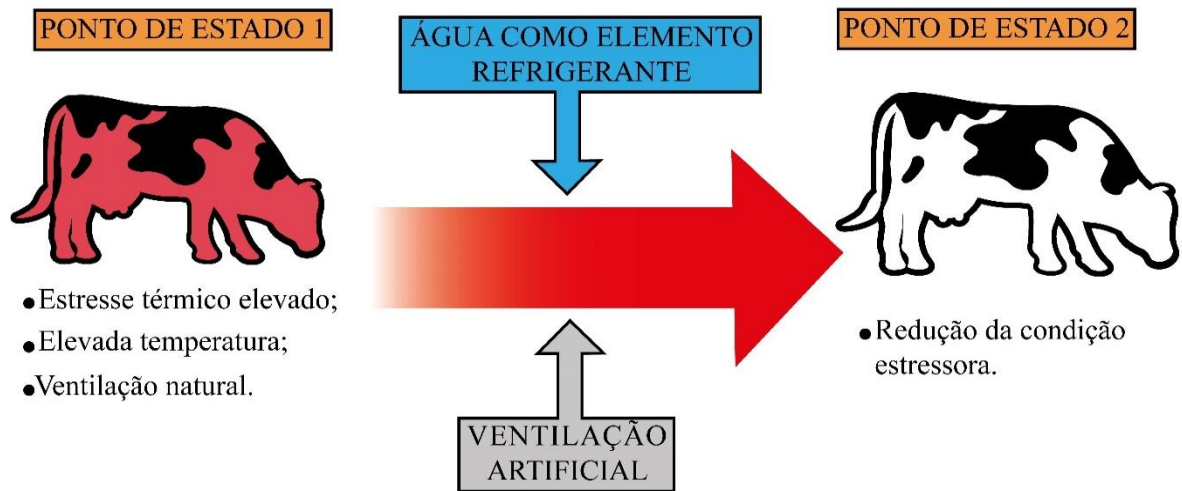
### 3.5 Estimativa do Índice de Temperatura e Umidade

Após a obtenção dos arquivos CSV contendo os dados extraídos e filtrados, o ITU foi calculado utilizando as médias mensais obtidas, conforme a Equação 1, proposta por Armstrong (1994).

### 3.6 Estimativa da Capacidade Teórica de Redução de CTR

Para determinação da CAP, foram definidos dois pontos de estado. As características dos pontos de estado, que definem as condições inicial e simulada, estão ilustradas na Figura 3.

Figura 3 – Representação esquemática da transição da condição inicial para a condição simulada



Fonte: Autores.

### 3.6.1 Estimativa da CTR inicial

Com base nos dois pontos de estado, foi calculada a TRMi, por meio da Equação 3. Entretanto, para cálculo da TRMi, inicialmente é necessário calcular a temperatura de globo negro ( $T_{gn}$ ). Como essa última variável não era disponibilizada nos bancos de dados de estações meteorológicas, foi estimada por meio da Equação 10, proposta por Abreu et al, (2011).

$$T_{gn} = 0,456 + 1,0335 \times T_{bs} \quad (10)$$

Em que:  $T_{gn}$  é a temperatura de globo negro do ar, em °C; e

$T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar, em °C.

Após a determinação da  $T_{gn}$ , foi calculada a TRMi (Equação 3) e, posteriormente, a CTRi (Equação 4).

### 3.6.2 Estimativa da CTR simulada

Após o cálculo da CTR<sub>i</sub> e com as características psicométricas conhecidas, o próximo passo foi determinar a CTR para o ponto de estado 2 (CTR<sub>sim</sub>), em que há utilização de ventilação forçada e a temperatura do ar é reduzida.

Estabeleceu que, ao atingir o ponto de estado 2, ou seja, quando a mistura atinge as características psicométricas desejadas, que simulam a utilização da técnica de resfriamento, a temperatura do sistema era a temperatura simulada ( $T_s$ ) que, em termos práticos, era igual a temperatura de ponto de orvalho no estudo em questão. Tal consideração foi realizada porque o resfriamento não poderia ser definido como isobárico, uma vez que ocorria adição de vapor d'água na mistura e o ar só atinge a  $T_{po}$  quando o resfriamento é isobárico. Entretanto, apesar de teoricamente o resfriamento não ser isobárico, a variação de pressão de vapor que a adição de água no sistema iria proporcionar era infinitesimal, quando comparada a pressão atmosférica. Desse modo, o sistema não atingia a  $T_{po}$ , mas sim um valor de temperatura muito próximo a mesma.

A CTR<sub>sim</sub> foi calculada por meio de uma adaptação da equação proposta por Esmay (1982). Nesse caso,  $T_{bs}$  foi substituída pela  $T_s$ , e foi considerada a condição de ventilação forçada, em que  $V_v$  é igual a  $2,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Enfim, a TRM<sub>sim</sub> foi determinada por meio da Equação 11.

$$TRMs = 100 \times \sqrt[4]{(2,51 \times \sqrt{2,5} \times (T_{gn\_sim} - T_s) + \left(\frac{T_{gn}}{100}\right)^4} \quad (11)$$

Em que:  $T_s$  é a temperatura simulada média, em K; e

$T_{gn\_sim}$  é a temperatura de globo negro média simulada, em K.

Posteriormente, foi necessário calcular a CTR<sub>sim</sub>, por meio da Equação 4.

### 3.6.3 Estimativa da CAP e da Eficiência

De posse CTR<sub>i</sub> e CTR<sub>sim</sub>, foi estabelecida uma variável capaz de quantificar a redução da CTR com o uso da técnica de resfriamento evaporativo (CAP), definida por meio da Equação 12.

$$CAP = CTR_i - CTR_{sim} \quad (12)$$

Em que:  $CTR_i$  é a Carga Térmica Radiante Inicial, em  $W \cdot m^{-2}$ ; e

$CTR_{sim}$  é a Carga Térmica Radiante Simulada, em  $W \cdot m^{-2}$ .

Por fim, a eficiência do processo de redução de Carga Térmica Radiante foi calculada pela ( $Efi$ ), utilizando a Equação 13.

$$Efi = \frac{CAP \times 100}{CTR_i} \quad (13)$$

Em que:  $CTR_i$  é a Carga Térmica Radiante Inicial, em  $W \cdot m^{-2}$ ;

$CTR_{sim}$  é a Carga Térmica Radiante Simulada, em  $W \cdot m^{-2}$ .

### 3.7 Estimativa da Variação de Umidade Absoluta

A quantidade de vapor que deveria ser inserida para fazer com que a  $T_{bs}$  fosse reduzida a  $T_s$  foi definida como  $\Delta UA$ . Dessa maneira, inicialmente, foi calculada a pressão de saturação do ar, por meio da Equação de Tetens (1930) (Equação 14), adaptada para as variáveis de interesse (VIANELLO; ALVES, 2012).

$$T_{PO} = \frac{186,4905 - 273,3 \times \log_{10} e}{(\log_{10} e) - 8,2859} \quad (14)$$

Em que:  $e$  é a pressão de vapor, em  $hPa$ .

$T_{PO}$  é a temperatura no ponto de orvalho, em  $^{\circ}C$ .

É importante destacar que foram coletados dados de  $T_{po}$ , mas a pressão de vapor era uma variável ausente. Por esse motivo, a pressão de saturação de vapor foi estimada por meio manipulações matemáticas da Equação 11 e tomando como base a  $T_{PO}$ , possibilitando que o cálculo da pressão de vapor fosse realizado (Equação 15).

$$e = 10^{\frac{186,4905 - T_{PO} \times 8,2859}{T_{PO} - 273,3}} \quad (15)$$

Em que:  $e$  é a pressão de vapor, em  $hPa$ .

$T_{po}$  é a temperatura no ponto de orvalho, em  $^{\circ}C$ .

Após a estimativa da pressão de vapor, foi calculada a pressão de saturação ( $es$ ), por meio da Equação de Tetens (Equação 16) (VIANELLO; ALVES, 2012).

$$es = 6,1121 \exp\left(\frac{22,587 \times T_{bs}}{273,86 + T_{bs}}\right) \quad (16)$$

Em que:  $es$  é a pressão de saturação de vapor, em  $hPa$ .

$T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar, em  $^{\circ}C$ .

De posse de " $e$ " e de " $es$ ", foi calculada a  $\Delta UA$  em  $g \cdot m^{-3}$ , por meio da Equação 17.

$$\Delta UA = 216,68 \times \left[ \left( \frac{es}{T_{po}} \right) - \left( \frac{e}{T_{bs}} \right) \right] \quad (17)$$

Em que:  $es$  é a pressão de saturação de vapor, em  $hPa$ ;

$T_{bs}$  é a temperatura de bulbo seco do ar, em  $^{\circ}C$ ;

$e$  é a pressão de vapor, em  $hPa$ ;

$T_{po}$  é a temperatura no ponto de orvalho, em  $^{\circ}C$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação climática da base de dados

Aspectos climáticos dos municípios de Luziânia, Uberlândia e Uruguaiana são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Variáveis climáticas mensais para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS), no período de 2007 a 2023

Mês	Município								
	Luziânia (GO)			Uberlândia (MG)			Uruguaiana (RS)		
	T <sub>bs</sub>	UR	V <sub>v</sub>	T <sub>bs</sub>	UR	V <sub>v</sub>	T <sub>bs</sub>	UR	V <sub>v</sub>
Janeiro	24,0	67,4	1,5	24,9	65,1	1,3	26,5	63,7	1,4
Fevereiro	23,9	68,7	1,4	24,9	64,8	1,3	25,7	65,1	1,4
Março	23,9	68,4	1,4	24,8	65,0	1,3	23,5	68,5	1,4
Abril	23,6	66,0	1,5	24,1	60,4	1,3	20,8	70,3	1,3
Maiο	22,2	60,1	1,7	22,1	56,6	1,3	16,6	77,9	1,4
Junho	21,2	56,1	1,8	21,4	54,1	1,3	13,9	80,1	1,3
Julho	21,1	47,9	1,8	21,4	45,8	1,4	13,6	75,4	1,4
Agosto	22,7	40,6	1,9	24,0	55,4	1,4	15,2	70,9	1,5
Setembro	25,3	37,9	1,8	25,7	37,7	1,5	17,6	70,3	1,5
Outubro	25,6	49,5	1,7	26,0	49,0	1,4	20,5	66,3	1,5
Novembro	24,1	66,5	1,5	25,1	60,7	1,4	23,6	58,6	1,4
Dezembro	23,9	68,9	1,5	25,0	64,8	1,4	25,6	59,7	1,4
Média	23,5	58,2	1,6	24,1	56,6	1,3	20,3	68,9	1,4

T<sub>bs</sub> = temperatura de bulbo seco, em °C; UR = umidade relativa, em %; V<sub>v</sub> = velocidade do vento, em m·s<sup>-1</sup>.

Fonte: Autores.

Pela Tabela 2 nota-se que os municípios de Luziânia e Uberlândia apresentam o comportamento das variáveis temperatura e umidade relativamente próximas, em termos relativos. Em ambos os municípios no período de verão são observadas as maiores temperaturas médias e as maiores umidades relativas. Diante disso, apesar de tal cenário representar uma maior presença de condição estressora e uma maior necessidade de utilização de técnicas de condicionamento a capacidade de realização de trocas térmicas latentes é considerada inferior,

devido a umidade relativa identificada estar mais próxima ao ponto de saturação. Tal comportamento é compatível com o clima predominante dos estados nos quais Luziânia e Uberlândia estão localizados, uma vez que, Minas Gerais e Goiás possuem predominância de clima tropical, caracterizado por invernos e secos e frios e verões úmidos e quentes.

Em Uruguaiana (Tabela 2) em termos de temperatura e umidade foi observado que no período de verão as temperaturas são mais elevadas, entretanto, as maiores umidades relativas são observadas no outono e no inverno. Diante do exposto, nota-se que os períodos mais quentes são mais secos e permitem uma maior realização de trocas térmicas latentes. Ademais, os períodos mais frios são marcados por menores frequências de estresse térmico e conseqüentemente, as trocas térmicas latentes são menos frequentes e possuem menos capacidade de reduzir uma condição termicamente estressora. O comportamento de tais variáveis de Uruguaiana é considerado compatível às características climáticas predominantes do Rio Grande do Sul. Visto que, no clima subtropical as estações verão e inverno são mais distinguíveis e as chuvas são menos concentradas nos meses iniciais e finais de um ano.

Em termos de velocidade do vento nos 3 municípios foram observadas as maiores velocidades de vento no período de inverno e início da primavera (Tabela 2). Sendo possível inferir que os períodos termicamente mais estressores os benefícios da ventilação natural não são máximos.

Após a avaliação das condições climáticas locais no “*t Student*” foram obtidos 408 graus de liberdade e um  $t_{tabelado}$  entre 1,96 a 1,98, considerando uma significância de 0,05 (FÁVERO, 2017). Diante disso, a potencial presença de significância estatística foi listada na Tabela 3 (GRITSENKO; NIKULIN, 1996).

Tabela 3 – Resultados do teste “*t Student*” para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS); variáveis temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ), umidade relativa (UR) e velocidade do vento (Vv)

Variável	Combinação de municípios	$t_{observado}$	Significância estatística
$T_{bs}$	Luziânia e Uberlândia	3,458	Não significativa
	Uruguaiana e Luziânia	9,045	Não significativa
	Uberlândia e Uruguaiana	10,575	Não significativa
UR	Luziânia e Uberlândia	2,447	Significante
	Uruguaiana e Luziânia	9,921	Não significativa
	Uberlândia e Uruguaiana	13,554	Não significativa
Vv	Luziânia e Uberlândia	1,485	Significante
	Uruguaiana e Luziânia	5,545	Não significativa
	Uberlândia e Uruguaiana	0,279	Significante

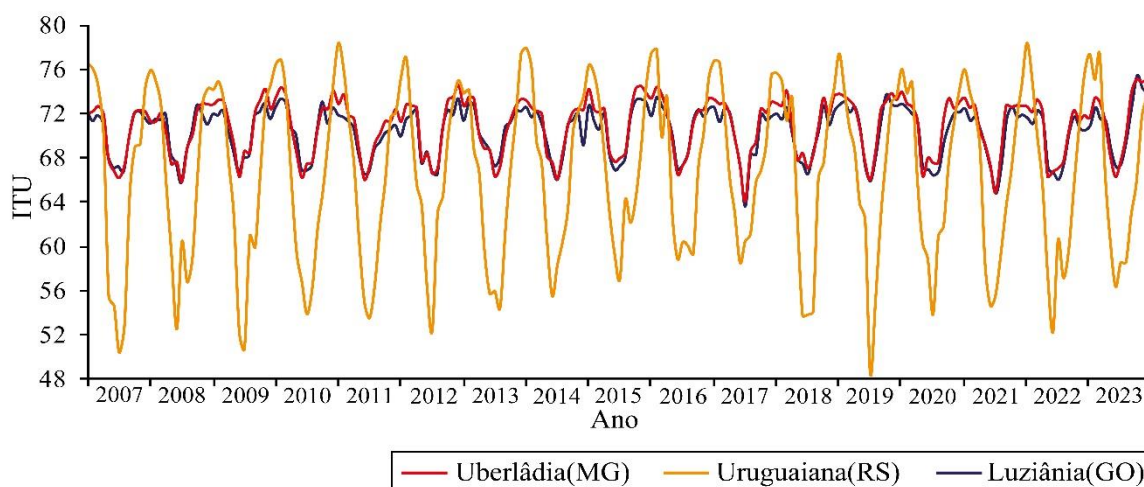
Fonte: Autores.

Diante dos resultados listados na Tabela 3 pode-se afirmar que foi identificada a presença de significância estatística apenas entre Luziânia e Uberlândia (UR), entre Luziânia e Uberlândia (Vv) e entre Uberlândia e Uruguaiana (Vv).

#### 4.2 Avaliação da condição térmica pelo Índice de Temperatura e Umidade

Para uma caracterização do ambiente térmico animal, por meio do ITU, foram construídas curvas de variação temporal, que estão ilustradas na Figura 4.

Figura 4 - Série completa das distribuições das médias mensais de Índice de Temperatura e Umidade (ITU)



Fonte: Autores.

Nota-se, por meio da Figura 4, que os valores de ITU obtidos possuíam amplitudes distintas para os diferentes municípios, mas que o comportamento da variável no decorrer de cada ano, tendeu a se repetir. Para os municípios de Luziânia e Uberlândia (Figura 4), as amplitudes de variação foram menores, quando comparados a Uruguaiana, evidenciando que, no decorrer de um ano, foram observadas diferentes condições térmicas. Para Uberlândia e Luziânia, observou-se que o ITU calculado variou de 64,0 e 76,0, configurando condições caracterizadas como de bem-estar animal e de estresse térmico. Pois, quando o ITU assume valores superiores a 70,0, bovinos leiteiros de alta produção estão expostos ao estresse térmico por calor (Armstrong, 1994).

Já para o município de Uruguaiana (Figura 4), notou-se que a amplitude de variação do ITU era muito superior, estando entre 50,0 e 80,0, quando comparada às obtidas para Uberlândia e Luziânia. Sob tal perspectiva, pode-se afirmar que em Uruguaiana o ITU tende a atingir valores mais extremos em relação às 3 localidades em alguns períodos do ano. Tal comportamento configura indício de que as condições térmicas são mais desafiadoras em Uruguaiana, já que os elevados valores de ITU obtidos denotaram situação de emergência, conforme a classificação de Armstrong (1994). Entretanto, apesar de ser observada maior amplitude de variação em Uruguaiana, há a necessidade de verificação quantitativa dos valores médios de ITU mensais para todos os municípios. Os resultados obtidos na verificação quantitativa estão listados na Tabela 4.

Tabela 4 – Distribuição anual das médias mensais de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e de seus respectivos coeficientes de variação (CV, em %), obtidos para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS) no período de 2007 a 2023

Mês	Município					
	Luziânia (GO)		Uberlândia (MG)		Uruguaiana (RS)	
	ITU	CV (%)	ITU	CV (%)	ITU	CV (%)
Janeiro	79,97 ± 0,79	1,09	72,95 ± 0,94	1,29	75,25 ± 1,16	1,54
Fevereiro	72,00 ± 0,80	1,11	73,07 ± 0,90	1,23	74,30 ± 1,05	1,41
Março	72,05 ± 0,62	0,86	72,99 ± 0,79	1,09	71,45 ± 1,92	2,69
Abril	71,31 ± 0,74	1,04	71,56 ± 0,91	1,27	67,60 ± 2,19	3,24
Maiο	68,75 ± 1,07	1,55	68,43 ± 1,08	1,57	61,33 ± 2,11	3,44
Junho	67,22 ± 0,59	0,88	67,27 ± 0,92	1,37	57,10 ± 2,49	4,36
Julho	66,47 ± 1,08	1,62	66,70 ± 1,08	1,61	56,62 ± 3,43	6,06
Agosto	67,93 ± 0,83	1,22	68,24 ± 0,88	1,29	59,11 ± 2,88	4,88
Setembro	70,69 ± 1,08	1,52	71,18 ± 1,08	1,52	62,72 ± 1,92	3,06
Outubro	72,36 ± 1,19	1,64	72,86 ± 0,98	1,34	66,86 ± 1,47	2,20
Novembro	72,00 ± 0,97	1,34	72,90 ± 1,08	1,41	70,64 ± 1,27	1,80
Dezembro	71,94 ± 1,11	1,55	73,26 ± 0,95	1,29	73,55 ± 0,97	1,32
Média	70,40 ± 0,90	1,30	72,95 ± 1,00	1,40	66,38 ± 1,90	3,00

Fonte: Autores.

Com base nos dados mensais listados na Tabela 4, constatou-se que o ITU tendeu a ser superior a 70 nos primeiros meses do ano (janeiro a março), para todos os municípios, indicando ocorrência de estresse térmico por calor nesse período. Posteriormente, após abril, constatou-se que o ITU calculado era inferior a 70,0 em todos os municípios, denotando que, nesse período, a necessidade de uso das técnicas de resfriamento eram menores, uma vez que as médias mensais de ITU não denotaram ocorrência de estresse térmico por calor. Em linhas gerais, nos meses que sucederam agosto (setembro, outubro, novembro e dezembro) notou-se que o ITU tendeu a se elevar novamente, atingindo valores superiores a 70,0 em Uberlândia e Luziânia, indício da ocorrência de estresse térmico por calor em ambos os municípios. Já em Uruguaiana tal comportamento é observado apenas em novembro e dezembro.

O comportamento de ocorrência de elevados valores de ITU nos meses iniciais do ano (de janeiro a abril), seguido de decréscimo nos meses centrais (de maio a julho), e aumento

nos meses finais do ano (agosto a dezembro) também foi observado no estudo conduzido por Xavier et al. (2022). Tais autores objetivaram uma análise comparativa de índices relacionados a conforto térmico animal no município de Viçosa (MG), observaram que os dias mais quentes e com valores mais elevados de ITU ocorreram nos meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro.

As condições de ITU listadas na Tabela 4 também podem ser relacionadas e comparadas às constatações do estudo de Barn et al. (2022), realizado no município de Cajuri (MG). Esse estudo foi conduzido em um sistema de confinamento do tipo *Compost Barn* aberto, com ventilação por pressão positiva, e teve como objetivo avaliar as condições térmicas aos quais bovinos leiteiros de alta produção estavam submetidos. Os autores observaram que as condições térmicas se mantiveram relativamente constantes no decorrer do período experimental, que compreendeu três semanas do mês de julho de 2021. Nesse estudo, os valores mais elevados de temperatura e ITU foram observados no período tarde. Todavia, por meio do ITU calculado verificou-se que as condições observadas eram termicamente confortáveis aos animais alojados. Desse modo, as constatações de Barn et al. (2022) são compatíveis aos resultados obtidos nesse estudo, em que o ITU médio nos meses centrais do ano (de maio a agosto) denotou ausência de estresse térmico por calor.

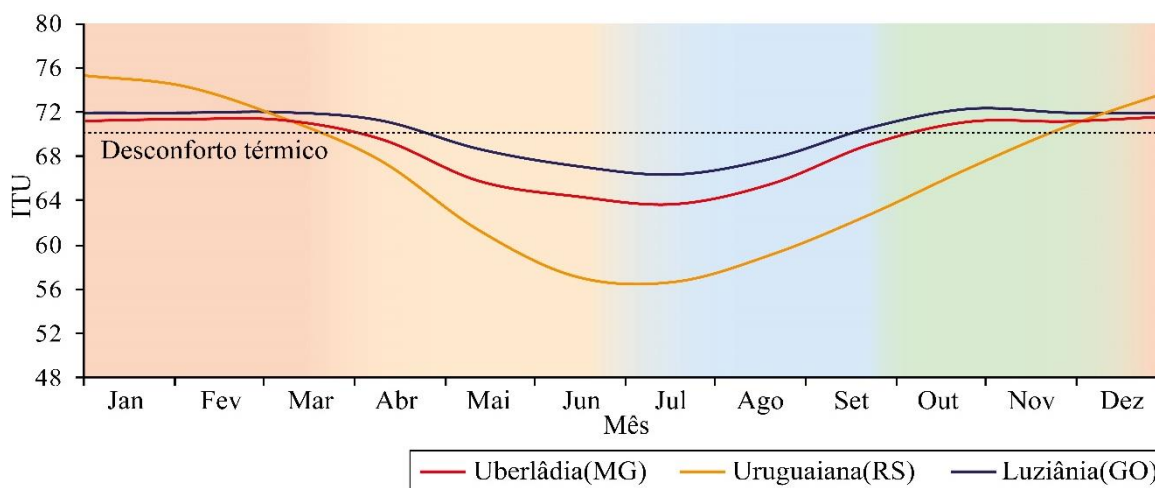
Para Luziânia, o ITU médio calculado para setembro foi de  $70,69 \pm 1,08$  (Tabela 4), o que representa indício de condições levemente estressoras aos animais. O mesmo foi observado para outubro, novembro e dezembro, em que os valores médios de ITU calculados permaneceram elevados, com a máxima observada em outubro, sendo igual a  $72,36 \pm 1,19$ . Para Uberlândia, o comportamento médio de ITU foi próximo àquele observado em Luziânia, ocorrendo elevação até atingir condições consideradas termicamente estressoras no mês setembro, com valor  $71,18 \pm 1,08$ , condição essa que se manteve até dezembro ( $73,26 \pm 0,95$ ). Com base nos resultados retratados até o momento, foi notório que Uruguaiana tendeu a apresentar comportamentos mais distintos, quando comparada a Uberlândia e Luziânia. Em Uruguaiana, foram obtidos os valores mais baixos de ITU (Tabela 4), atingindo o extremo inferior de  $56,62 \pm 3,43$  em julho. Entretanto, apesar dos valores médios de ITU serem consideravelmente menores nos meses de abril a outubro, quando comparado a Uberlândia e Luziânia, em novembro e dezembro o ITU calculado variou consideravelmente e atingiu  $70,64 \pm 1,27$  e  $73,55 \pm 0,97$ , respectivamente, denotando ocorrência de condições de estresse térmico por calor.

Por meio dessa avaliação (Tabela 4), constatou-se que em termos médios anuais, o ITU mais elevado foi observado em Uberlândia (cerca  $72,95 \pm 1,00$ ), sendo este, portanto, o

município que mais necessita de utilização de técnicas de condicionamento térmico. O segundo município com maior média total de ITU é Luziânia ( $70,40 \pm 0,90$ ) e Uruguaiana foi o local em que foi obtido o menor ITU médio, bem como único local em que foi observado ITU inferior a 70. Apesar disso, os valores médios totais não podem ser considerados indícios de que não há necessidade da utilização de técnicas de resfriamento em Uruguaiana. De acordo com o que foi listado na Tabela 4, em Uruguaiana é mais provável que, no decorrer do ano, a ocorrência de estresse térmico por calor seja menos frequente e mais concentrada em alguns meses do ano. Porém, quando observada essa condição, atingiu-se limites superiores muito elevados, conforme a classificação de Armstrong (1994).

Outro ponto que deve ser destacado é a homogeneidade dos dados observados. Por meio das informações listadas na Tabela 4, constatou-se que Luziânia possui a base de dados mais homogênea, devido a seu coeficiente de variação (CV) de 1,30 %, seguido de Uberlândia com CV de 1,40 %. Por fim, constatou-se que Uruguaiana possui a base de dados menos homogênea das 3 cidades, com CV igual 3,00 %. Após a avaliação do ITU ao longo da série temporal o comportamento da variável ao longo das estações do ano está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Distribuição anual das médias mensais de Índice de Temperatura e Umidade (ITU), utilizando o limite de estado de conforto de Armstrong (1994)



Fonte: Autores.

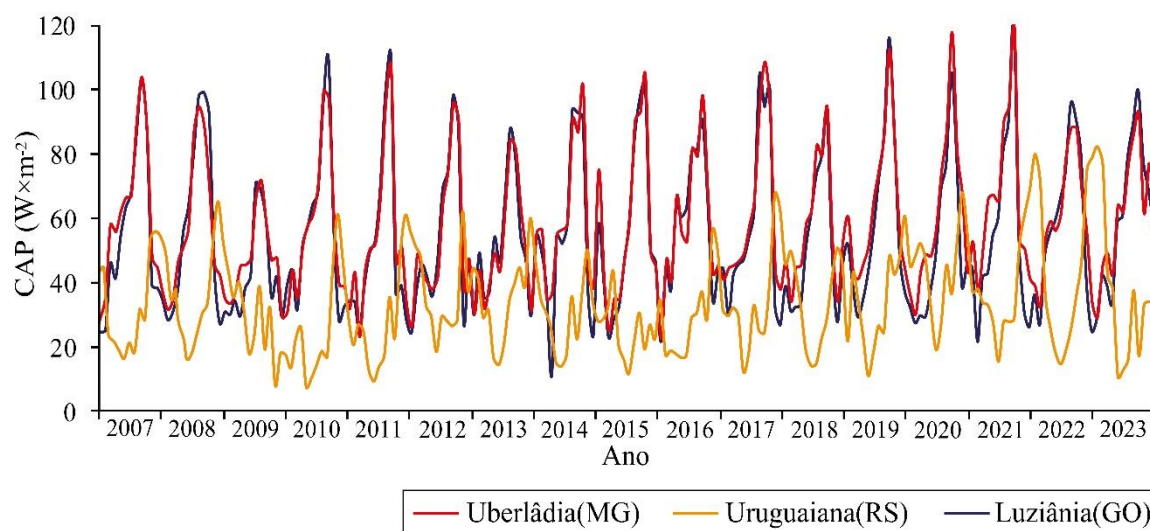
Nos três municípios em estudo, constatou-se que o ITU tendeu a decrescer nos períodos de outono e inverno (Figura 5). Nos meses de janeiro, fevereiro e em parte do mês de março que correspondem ao período de verão, observou-se que o ITU calculado era superior a 70, nos três municípios, denotando ocorrência de estresse térmico, com maiores valores obtidos em Uruguaiana. Em seguida, quando se iniciou o outono, sucedido pelo inverno, observou-se

decréscimo dos valores de ITU, para todas as cidades, sendo que os menores e maiores decréscimos foram observados em Luziânia e Uruguaiana, respectivamente. Por fim, quando as temperaturas voltaram a ficar mais elevadas, na primavera, os três municípios voltaram a apresentar ascendência do ITU, sendo que Luziânia e Uberlândia apresentaram condições consideradas termicamente estressoras no final de setembro e início de outubro, respectivamente. Em Uberlândia, apesar da ocorrência de elevados valores de ITU no início do verão, voltou a apresentar condições consideradas termicamente estressoras apenas em novembro, ou seja, no final da primavera.

### 4.3 Avaliação da Capacidade Teórica de Redução de CTR

Na Figura 6, estão ilustradas as curvas de distribuição da variável em questão no decorrer da série temporal completa, de 2007 a 2023.

Figura 6 - Série completa das distribuições das médias mensais de Capacidade Teórica de Redução de CTR (CAP)



Fonte: Autores.

Por meio da análise da Figura 6, verificou-se que a CAP, assim como o ITU, também tendeu a variar consideravelmente ao longo do ano. Entretanto, apesar do comportamento anual tender a ser repetitivo, com a presença de decréscimos que atingiram os menores valores, seguidos de acréscimos que atingiram os limites superiores em todos os anos, a base de dados

era visualmente menos homogênea, quando comparada ao ITU. Isso significa que a CAP pode se comportar de formas distintas em um mesmo período, quando analisada em anos diferentes.

Com base na Figura 6, notou-se que nos municípios de Luziânia e Uberlândia foram observadas as maiores amplitudes de variação. Nesses municípios e em quase todos os anos, a CAP atingiu os limites superiores (aproximadamente  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), sucedendo-se de decréscimos, que atingiram o mínimo de  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

Para o município de Uruguaiana, observou-se comportamento distinto da série temporal quando comparado às séries de Luziânia e Uberlândia (Figura 6). Em Uruguaiana, notou-se a ocorrência de menor amplitude de variação, com valores mínimo inferiores a  $10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , e valores máximos abaixo de  $90 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Vale ressaltar que Uruguaiana apresentou, visualmente, as repetições menos homogêneas de todos os 3 municípios, sendo que as amplitudes de variação foram menos estáveis e os períodos de crescimento e decréscimo ao longo do ano não foram os mesmos. Após avaliação visual do comportamento da CAP ao longo de toda a série temporal, entendeu-se que era necessária avaliar tal variável em termos numéricos e mensais. Os dados dessa avaliação estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição anual das médias mensais de Capacidade Teórica de Redução de CTR (CAP, em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) e de seus respectivos coeficientes de variação (CV, em %), obtidos para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS) no período de 2007 a 2023

Mês	Município					
	Luziânia (GO)		Uberlândia (MG)		Uruguaiana (RS)	
	CAP	CV (%)	CAP	CV (%)	CAP	CV (%)
Janeiro	37,3 ± 10,6	28,4	39,2 ± 14,1	36,0	44,2 ± 18,3	41,4
Fevereiro	34,8 ± 8,70	25,0	40,1 ± 7,10	17,7	41,1 ± 16,9	41,0
Março	35,3 ± 7,40	20,8	40,0 ± 9,40	23,5	34,0 ± 8,90	26,1
Abril	38,2 ± 7,40	31,5	47,4 ± 9,30	19,6	30,0 ± 11,1	37,1
Maiο	49,2 ± 9,00	18,3	52,1 ± 8,50	16,4	19,1 ± 7,60	40,0
Junho	55,4 ± 7,70	14,0	55,9 ± 7,70	13,8	15,4 ± 2,80	18,2
Julho	70,3 ± 7,00	10,0	71,8 ± 9,40	13,1	21,3 ± 6,40	30,2
Agosto	87,5 ± 9,60	11,0	87,2 ± 7,80	8,90	27,9 ± 8,00	28,7
Setembro	97,5 ± 14,6	15,0	96,3 ± 15,0	15,5	29,9 ± 8,50	28,2
Outubro	72,8 ± 21,7	29,8	72,0 ± 18,5	25,7	36,7 ± 9,60	26,2

Novembro	39,2 ± 10,3	26,3	48,5 ± 10,5	21,7	50,6 ± 16,6	32,8
Dezembro	35,1 ± 9,70	27,6	40,9 ± 7,30	17,8	50,4 ± 16,7	33,2
Média	54,4 ± 10,7	21,5	57,6 ± 10,4	19,1	33,4 ± 11,0	31,9

Fonte: Autores.

Para Luziânia e Uberlândia, observou-se que os valores de CAP tenderam a ser menores, em termos relativos, nos primeiros meses do ano (de janeiro a março), apresentaram aumento nos meses centrais (de abril a setembro) e retornaram a decrescer nos meses finais (de outubro a dezembro) (Tabela 5). Em Luziânia, entre os meses de janeiro a abril, foram obtidas médias mensais inferiores a  $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Nesse caso, caso fosse necessário utilizar técnicas de resfriamento evaporativo, a CAP estimada variou de  $34,8 \pm 8,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  e  $38,2 \pm 7,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , em fevereiro e abril, respectivamente (Tabela 5). Apesar disso, notou-se crescimento considerável da CAP após abril, atingindo a marca de  $49,2 \pm 9,00 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  em maio. Nos meses seguintes, a CAP continuou apresentando comportamento crescente, até atingir o limite superior em setembro ( $97,5 \pm 14,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ). Após o fim de setembro, notou-se que a CAP tendeu novamente a reduzir, atingindo  $72,8 \pm 21,7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  em outubro, reduzindo novamente em novembro, e atingindo  $35,1 \pm 9,70 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  em dezembro (Tabela 5).

Em Uberlândia, notou-se que a CAP nos 3 primeiros meses do ano estava próxima de  $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Tabela 3). Em abril foi observada que o valor de CAP calculada era de  $47,4 \pm 9,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , e esse valor se elevou até atingir o máximo de  $96,3 \pm 15,0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , em setembro. Após o fim de setembro, a CAP tendeu a reduzir em outubro, novembro e atingiu o menor valor em dezembro ( $40,9 \pm 7,30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

Ao avaliar-se o comportamento da variável em questão para o município de Uruguaiana, percebeu-se que a mesma apresentou comportamento inverso, quando comparado às duas outras cidades (Tabela 5). Por mais que em Uruguaiana não foram observadas CAPs superiores a  $50,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , a distribuição da CAP atingiu extremos superiores no início e no final do ano, bem como extremos inferiores em meses centrais do ano (de maio a agosto). Em janeiro, o valor de CAP calculado foi  $44,2 \pm 18,3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , e esse valor tendeu a se reduzir até atingir o limite inferior de  $15,4 \pm 2,80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , em junho (Tabela 5). A posteriori, notou-se que a CAP novamente tendeu a crescer até atingir o limite superior de  $50,6 \pm 16,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , em novembro, e permaneceu elevada em termos relativos em dezembro, quando estava próxima de  $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  (Tabela 5).

Além das médias mensais, também foi analisada a homogeneidade da base de dados. Por meio dos dados listados na Tabela 3, constatou-se que Uberlândia possuía a base de dados

mais homogênea, devido a seu CV médio de 19,1%, seguido de Luziânia, com CV médio de 21,5%, e por Uruguaiana, que possuía a base de dados menos homogênea, com CV médio igual 31,9 %. Após uma avaliação numérica da CAP, precedeu-se com a análise em termos percentuais, cujos dados estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 - Distribuição anual das médias mensais de eficiência na redução da Carga Térmica Radiante (CTR) obtidos para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS) no período de 2007 a 2023

Mês	Eficiência (%)		
	Luziânia (GO)	Uberlândia (MG)	Uruguaiana (RS)
Janeiro	7,9	8,3	9,1
Fevereiro	7,4	8,4	8,6
Março	7,5	8,4	7,3
Abril	8,2	10,1	6,7
Mai	10,7	11,4	4,5
Junho	12,2	12,4	3,8
Julho	15,5	15,9	5,3
Agosto	18,8	18,8	6,8
Setembro	20,2	20,0	7,0
Outubro	15,1	14,9	8,2
Novembro	8,3	10,2	10,8
Dezembro	7,5	8,6	10,5
Média	11,6	12,3	7,4

Fonte: Autores.

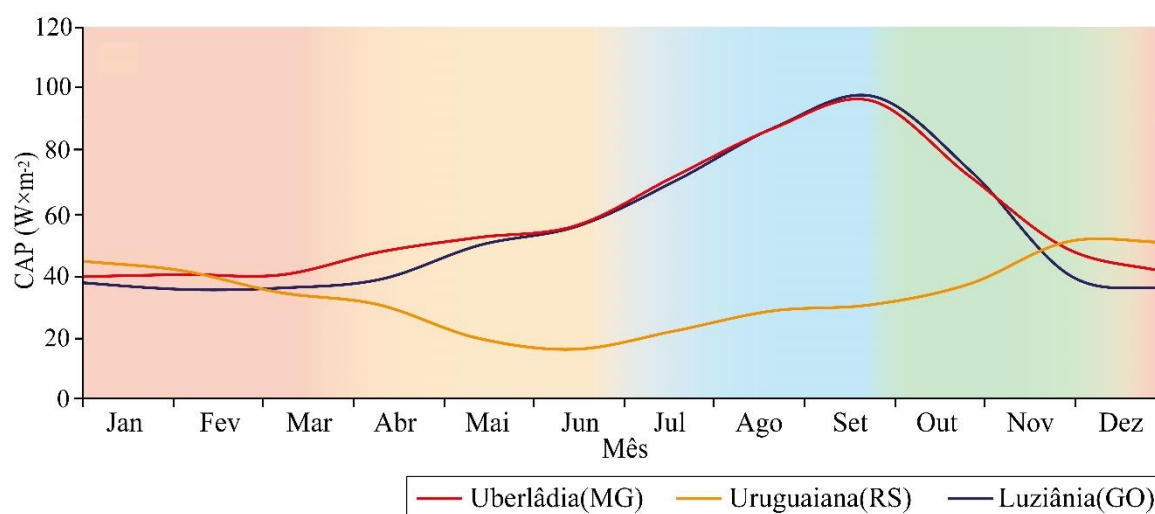
Percentualmente, notou-se que em Uberlândia e Luziânia foram verificadas as maiores eficiências, em termos médios, sendo atingidos os limites superiores de eficiência de 20,0 % e 20,2% em Uberlândia e Luziânia, respectivamente, no mês de setembro (Tabela 6). Ademais, em Uruguaiana foi observada a menor eficiência média, atingindo o seu limite superior de 10,8 % em novembro e eficiências mais elevadas nos meses iniciais e finais do ano, se distinguindo dos comportamentos apresentados em Uberlândia e Luziânia (Tabela 6).

A avaliação de redução de CTR em sistemas produtivos também foi objeto de estudo de outros pesquisadores, e pode ser realizada por metodologias de condicionamento distintas da utilização de resfriamento evaporativo. Pezzopane et al. (2019) realizaram uma análise

comparativa de índices de conforto térmico animal sob diferentes conformações arbóreas em sistemas silvipastoris. Os autores analisaram o comportamento dos indicadores de conforto térmico para as diferentes estações do ano e chegaram à conclusão de que a utilização de cobertura vegetal nos sistemas de produção animal, que anteriormente eram submetidos à radiação solar, possibilitou reduzir consideravelmente a CTR, chegando a extremos superiores de redução de até 27,0% da CTR em alguns horários do dia. Os mesmos autores também constataram que a CTR local variava de acordo com as distintas estações do ano, sendo verificadas maiores valores de CTR nos períodos da primavera e do verão, comparativamente ao outono e inverno. Tais constatações podem ser relacionadas com os resultados listados na Tabela 4, uma vez que, no presente estudo, também foi observada variação considerável da redução de CTR nas distintas estações do ano. Apesar de utilizar uma metodologia distinta para avaliação da redução de CTR, Pezzopane et al. (2019) contataram limites de eficiência muito próximos aos listados na Tabela 4.

Após as análises visuais e estatísticas realizadas, procedeu-se análise comparativa do comportamento de CAP para os municípios em estudo, para distintas estações do ano. Sob tal perspectiva, as médias mensais de CAP de um ano, para os 3 municípios, estão ilustradas na Figura 7.

Figura 7 – Distribuição anual média ao decorrer das estações do ano da Capacidade Teórica de Redução de CTR (CAP) para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS)



Fonte: Autores.

No que se refere ao comportamento da CAP em distintas estações, notou-se que essa variável tendeu a sofrer maiores alterações nos períodos de outono, primavera e inverno (Figura 7). No verão, observou-se que os valores de CAP calculados estavam em torno de  $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  para todos os municípios. Para Uruguaiana, em específico, a CAP reduziu e atingiu seu limite inferior, de aproximadamente  $20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , no mês de junho, enquanto os valores de CAP para Uberlândia e Luziânia aumentaram. Quando se iniciou o inverno, notou-se que em Uberlândia e Luziânia a CAP atingiu seu limite superior, mesmo condição observada para Uruguaiana, onde, apesar do crescimento observado, foram registrados valores inferiores aos obtidos para os demais municípios (Figura 7). Quando a primavera se iniciou, observou-se comportamento inverso, com decréscimo da CAP em Uberlândia e Luziânia observados até o final do ano, enquanto em Uruguaiana a CAP atinge seu limite superior, aproximadamente  $50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , se mantendo estável até o fim do ano.

Apesar da redução de CTR no estudo em questão ser proporcionada pela redução da temperatura do ar e pela utilização de ventilação forçada, valores próximos de redução de CTR também foram identificados utilizando diferentes materiais de cobertura. Barnabét al. (2015) conduziram experimento durante o período de verão no município de Pesqueira, no Agreste de Pernambuco, e avaliaram o comportamento de índices bioclimáticos para diferentes tipos de cobertura utilizadas em abrigos individuais de bezerros da raça Girolando. Os autores observaram que, nos períodos mais quentes do dia, a capacidade de amortecimento da CTR chegou a valores entre 37,0 e 40,0%, para os materiais de maior capacidade isolante. Com base nas constatações realizadas por Barnabét al. (2015) e nos resultados retratado no presente estudo, notou-se que a redução de CTR pode ser altamente variável e tende a ser eficiente com a utilização de diferentes técnicas de acondicionamento térmico animal. Isso significa que podem ser utilizadas técnicas de resfriamento evaporativo em unidades de bovinos leiteiros, em conjunto com a adoção de materiais de cobertura com propriedades amortecedoras, visando reduzir a transferência de calor para o interior da instalação.

#### **4.4 Potencialidade do uso de resfriamento evaporativo pela relação entre o ITU e CAP**

Inicialmente foi realizada avaliação das médias gerais de ITU e CAP de todos os meses e para toda série temporal estudada. Assim, por meio dos resultados listados nas Tabelas 2 e 3, que retratavam a relação geral média de ITU e CAP para os 3 municípios em estudo, foram obtidos os dados listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Capacidade Teórica de Redução de CTR (CAP) e Índice de Temperatura e Umidade (ITU) médios totais para os municípios Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS), no período de 2007 a 2023

<b>Município</b>	<b>ITU</b>	<b>CAP (<math>W \cdot m^{-2}</math>)</b>
Luziânia (GO)	70,40±0,90	54,4±10,7
Uberlândia (MG)	72,95±1,00	57,6±10,4
Uruguaiana (RS)	66,38±1,90	33,40±11,0

Fonte: Autores.

A potencialidade do uso de técnicas de resfriamento evaporativo leva em consideração a condição térmica animal, quantificando o quão desconfortável termicamente o animal estaria nas condições ambientais retratadas (por meio do ITU), e a possível redução da CTR por meio do resfriamento evaporativo (CAP). Por meio da análise conjunta dessas duas variáveis, notou-se que, em termos gerais, Uberlândia apresentou a maior potencialidade de uso da técnica de resfriamento evaporativo em bovinos leiteiros de alta produção (da Tabela 7). Tal afirmação se sustenta no fato de que, em Uberlândia, foi observado o maior ITU ( $72,95 \pm 1,00$ ) em conjunto com a maior CAP ( $57,6 \pm 10,4 W \cdot m^{-2}$ ). Isso indica que, para esse município e em termos médios, os bovinos leiteiros de alta produção foram expostos às condições médias consideradas mais desafiadoras do ponto de vista térmico. Portanto, esses animais necessitavam da utilização de acondicionamento térmico, visando proporcionar melhores condições térmicas aos animais alojados.

O segundo município com maior potencialidade de uso de resfriamento evaporativo seria Luziânia, por ter apresentado ITU médio de  $70,40 \pm 0,90$ , denotando ocorrência de estresse térmico por calor, conforme a classificação de Armstrong (1994) e uma CAP de  $54,4 \pm 10,7 W \cdot m^{-2}$ , sendo a segunda mais elevada (Tabela 7). Por fim, em Uruguaiana foi observada a menor potencialidade de uso de técnicas de resfriamento evaporativo, já que foram obtidos valores médios de ITU de  $66,38 \pm 1,90$  (Tabela 7), sendo o único município em que não denotou a ocorrência de estresse térmico por calor, conforme Armstrong (1994), e a CAP de  $33,40 \pm 11,0 W \cdot m^{-2}$ , sendo o valor mais baixo entre os três municípios em estudo.

Um ponto que deve ser destacado é que a avaliação da CAP associada ao ITU não é tão simplória, uma vez que a relação entre as variáveis denota diferentes cenários. O ITU, como variável crucial na determinação da presença de estresse térmico, é o principal indicativo da necessidade do uso de técnicas de resfriamento, visto que tal índice é capaz de definir se o animal está ou não sob condição de estresse térmico. Desse modo, quando o ITU não denota a

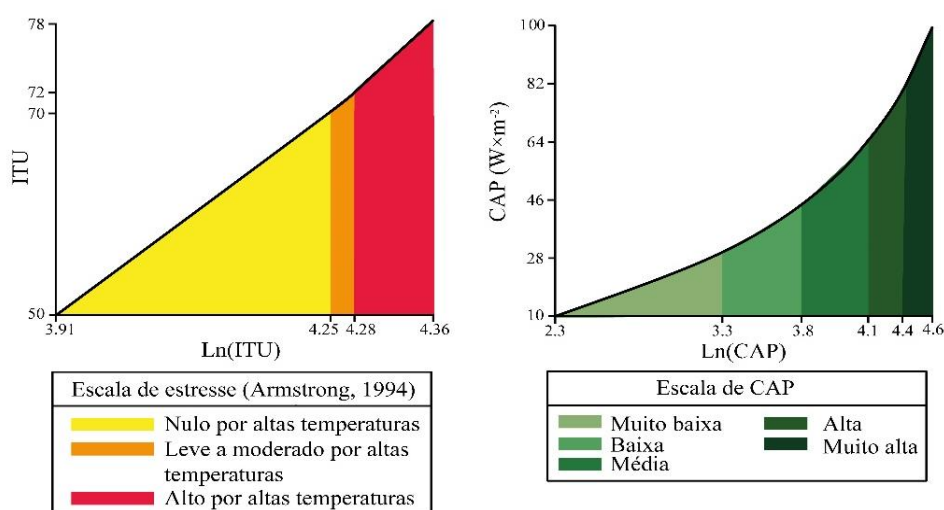
presença de estresse térmico, a técnica de resfriamento não será utilizada e a potencialidade será nula, por mais que a CAP possa ser elevada em termos relativos. Condição contrária é retratada quando são obtidos valores médios de ITU que caracterizaram ocorrência de estresse térmico em diferentes graus, mas a CAP foi considerada baixa, quando comparada a outros períodos do ano. Em casos como esse, a necessidade do uso de resfriamento evaporativo ainda é considerada alta, pois apesar do resfriamento ser menos eficiente, os bovinos de alta produção necessitam minimizar os efeitos do estresse térmico.

Resultados médios de ITU inferiores a 70 não podem ser considerados indícios da ausência de estresse térmico animal. Como o ITU calculado utiliza valores médios mensais, que são extraídos de dados horários e posteriormente diários, vão existir dias em que a necessidade de utilização das técnicas de resfriamento evaporativo será superior a outros, devido a presença de dias mais quentes e dias mais frios em um mesmo mês. Tal comportamento também é observado em função das horas, no qual em algumas horas do dia serão observadas maiores temperaturas, retratando valores mais elevados de ITU e necessidade da aplicação da técnica de resfriamento evaporativo. Por outro lado, em um mesmo dia existem momentos que apresentam menores temperaturas, indicando um ITU inferior e podendo não ser necessária a aplicação da técnica de resfriamento (ALMEIDA et al., 2011).

Com base nos resultados listados na Tabela 7, estabeleceu-se uma classificação clara, que indica em qual município a potencialidade de uso do resfriamento evaporativo é maior ou menor, por meio de valores médios. Uma análise mais detalhada das condições térmicas nos municípios em estudo foi conduzida e os resultados médios mensais de CAP e ITU alcançados estão ilustrados da Figura 8, que estabelece escalas de cores que representam distintas condições térmicas e eficiências no uso do resfriamento evaporativo.

Figura 8 – Escalas classificatórias de Capacidade Teórica de Redução de CTR (CAP) e Índice de Temperatura e Umidade (ITU) médios totais para os municípios Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS), no período de 2007 a 2023

A. Luziânia (GO)			B. Uberlândia (MG)			C. Uruguaiana (RS)		
Mês	ITU	CAP	Mês	ITU	CAP	Mês	ITU	CAP
Jan	72	37	Jan	73	39	Jan	75	44
Fev	72	35	Fev	73	40	Fev	74	41
Mar	72	35	Mar	73	40	Mar	71	34
Abr	71	38	Abr	72	47	Abr	68	30
Mai	69	49	Mai	68	52	Mai	61	19
Jun	67	55	Jun	67	56	Jun	57	15
Jul	66	70	Jul	67	72	Jul	57	21
Ago	68	87	Ago	68	87	Ago	59	28
Set	71	97	Set	71	96	Set	63	30
Out	72	73	Out	73	72	Out	67	37
Nov	72	39	Nov	73	48	Nov	71	51
Dez	72	35	Dez	73	41	Dez	74	50



Fonte: Autores.

Por meio da Figura 8, notou-se que, em todos os municípios em estudo, as condições térmicas médias tenderam a denotar conforto térmico nos meses centrais do ano, entre maio e agosto para todos os municípios. Assim, por mais que em Luziânia (Figura 8A) e Uberlândia (Figura 5B) sejam observados os maiores valores de CAP, entre maio a agosto, os valores de ITU foram inferiores a 70, sendo indicio de que nesse período os bovinos estavam em estado de conforto e a necessidade da utilização de resfriamento evaporativo era baixa. Por outro lado, notou-se uma conjuntura distinta a partir de setembro, em ambos os municípios, nos quais

constatou-se a ocorrência de estresse térmico por calor, dado que foram obtidos valores de ITU iguais a 71, bem como maior CAP entre todos os meses. Tal condição configura indício de que que em setembro era necessário fazer uso de técnicas de resfriamento evaporativo, em Uberlândia e Luziânia, possibilitando que as condições térmicas aos quais os animais alojados estavam expostos fossem melhoradas.

Ainda para Luziânia e Uberlândia, constatou-se que de janeiro a abril, período de verão e outono, houve ocorrência de condições consideradas termicamente estressoras, e que a CAP nesses períodos, nos três municípios, variava entre  $30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  e  $40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , tornando necessário e viável a utilização de resfriamento evaporativo. Vale ressaltar que em Uberlândia o ITU foi superior ao ITU obtido em Luziânia, nos 3 primeiros meses do ano, em que também foram obtidos maiores valores de CAP. Desse modo, entendeu-se que havia maior potencial do uso da técnica de resfriamento evaporativo do ar e dos animais no verão em Uberlândia, quando comparado a Luziânia. Quando se observou o comportamento das variáveis em outubro, novembro e dezembro, verificou-se que, para os três municípios, foi registrada ocorrência de condições termicamente estressoras para bovinos leiteiros de alta produção em lactação, destacando Uberlândia e Luziânia com maior CAP e ITU em novembro e dezembro.

Tais resultados observados até o momento podem ser relacionados com o estudo conduzido por Drwencke et al. (2020). Na pesquisa conduzida por tais autores foram avaliadas estratégias de resfriamento voltadas à mitigação do estresse térmico de bovinos leiteiros, durante o verão da Califórnia. Foram utilizadas cerca de 4 estratégias distintas entre si, combinando bicos de pulverização e intervalos de molhamento dos animais. Para caracterização do ambiente e da condição anterior a aplicação dos métodos de resfriamento, foram utilizadas variáveis climatológicas como temperatura de bulbo seco, umidade relativa e ITU. Por meio dos resultados alcançados, os autores retratam valores médios de ITU de  $72,1 \pm 7,0$ , sendo próximo aos valores de ITU observadas para períodos de verão na Figura 8. Como conclusão, por meio de respostas comportamentais dos bovinos leiteiros, Drwencke et al. (2020) constataram que todas as técnicas de resfriamento utilizadas eram eficientes em melhorar as condições térmicas.

Quando se avaliou a CAP e o ITU para Uruguaiana por meio da Figura 8C, notou-se que a mesma tendeu a apresentar comportamentos distintos, quando comparada a Luziânia e Uruguaiana. Para tal município, foram observados os maiores valores de ITU e CAP, no período de verão e mais especificamente em janeiro e fevereiro, caracterizando indício de que, para esses meses, havia maior potencial para uso de resfriamento evaporativo. Entretanto, em março observou-se uma redução do ITU, com prevalência de valores inferiores a 72, condição de

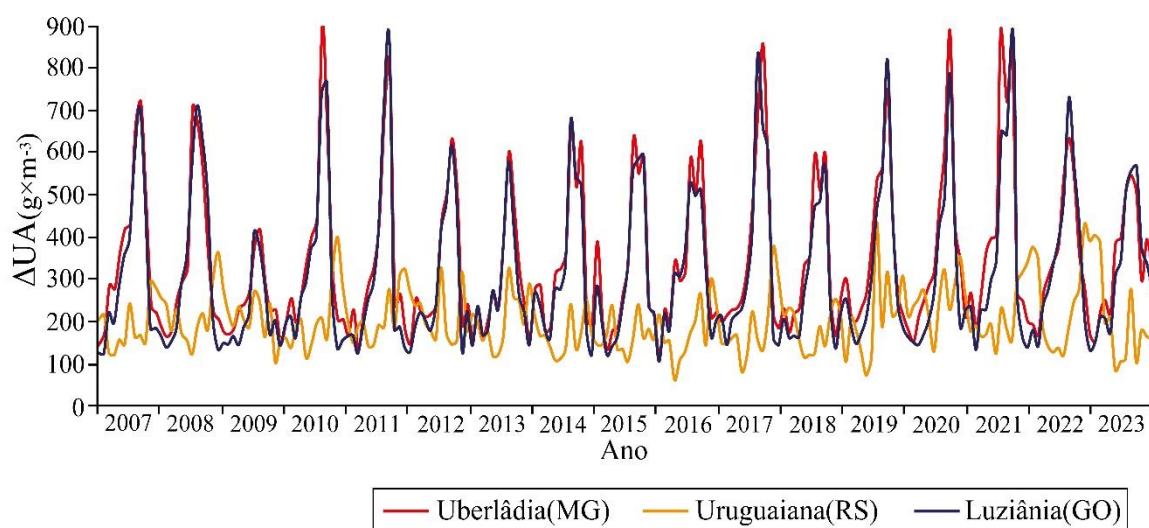
redução que também ocorreu para a CAP. Posteriormente, em Uruguaiana, observou-se aumento dos valores de ITU em novembro, caracterizando indício de ocorrência de estresse térmico. Em dezembro, Uruguaiana voltou a registrar os maiores valores médios de ITU das 3 cidades e também a maior CAP.

Foroushani & Amon (2022) analisaram o potencial de uso de resfriamento evaporativo em bovinos leiteiros de alta produção por meio da utilização de um método gráfico, que apesar de não levar em consideração a CTR, estabelecia limites de eficiência baseados no ITU, nas pressões de vapor e nas variações de temperatura ambiente. Em celeiros em clima continental na Europa Central, os autores constataram que quando o ITU era inferior a 64, o potencial de uso de resfriamento é nula, ao passo que quando o ITU era superior a 64, a variação de temperatura do ar era superior a 2,0°C e, portanto, resfriamento evaporativo era necessário. Apesar de serem utilizados limites de ITU distintos do estudo em questão, as constatações de Foroushani & Amon (2022) corroboram para a utilização da variável ITU como uma variável limitadora, que caracteriza indícios de necessidade ou não de uso de técnicas de acondicionamento térmico, com base em intervalos pré-estabelecidos capazes de avaliar a condição térmica animal.

#### **4.5 Avaliação da Variação Teórica de Umidade Absoluta**

Como a grandeza potencialidade foi definida com base na alteração do estado psicrométrico, entende-se que é fundamental avaliar a variação das umidades absolutas. Assim, o comportamento de  $\Delta U_A$  ao longo de toda a série temporal é ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Série completa das distribuições das médias mensais de Variação de Umidade Absoluta ( $\Delta UA$ )



Fonte: Autores.

Com base nos resultados ilustrados na Figura 9, os valores de  $\Delta UA$  obtidos possuíam amplitudes distintas para os diferentes municípios, mas o comportamento da variável ao decorrer de cada ano tendeu a se repetir para Luziânia e Uberlândia, e apresentar comportamento distinto, sem repetições facilmente observadas, em Uruguaiana. Em Luziânia e Uberlândia, as amplitudes de variação tenderam a se manter no intervalo entre  $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  e  $900 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , e valores próximos aos limites inferiores e superiores foram observados em todos os anos. Entretanto, quando se observou o comportamento de Uruguaiana, notou-se que os padrões tenderam a não ser tão repetitivos, quando comparados ao padrão dos outros 2 municípios estudados. Em Uruguaiana a  $\Delta UA$  atingiu distintos picos em épocas diferentes, ao longo do período em estudo, e não se observou presença de alterações bruscas nos períodos mais quentes e frios. Além da desuniformidade visual, as amplitudes de variação também tenderam a ser inferiores em Uruguaiana, sendo observados limites inferiores e superiores em torno de  $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  e  $400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectivamente (Figura 9). As medias mensais de ( $\Delta UA$ ) estão listadas na Tabela 6.

Tabela 8 – Distribuição anual das médias mensais de Variação de Umidade Absoluta ( $\Delta UA$ , em  $g \cdot m^{-3}$ ) e de seus respectivos coeficientes de variação (CV, em %), obtidos para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS) no período de 2007 a 2023.

Mês	Município					
	Luziânia (GO)		Uberlândia (MG)		Uruguaiana (RS)	
	$\Delta UA$	CV (%)	$\Delta UA$	CV (%)	$\Delta UA$	CV (%)
Janeiro	186,3 ± 51,9	27,9	205,3 ± 69,5	33,9	220,9 ± 76,4	34,6
Fevereiro	178,6 ± 37,4	20,9	207,7 ± 37,3	18,0	209,1 ± 68,8	32,9
Março	180,5 ± 35,6	19,7	207,1 ± 43,0	20,8	180,5 ± 31,7	17,5
Abril	200,7 ± 47,0	23,4	248,6 ± 50,5	20,3	176,4 ± 51,9	29,5
Maiο	259,6 ± 51,6	19,9	299,7 ± 57,3	19,1	134,0 ± 42,8	31,9
Junho	312,0 ± 56,5	18,1	337,7 ± 58,3	17,3	132,0 ± 20,0	15,2
Julho	451,2 ± 82,4	18,3	506,9 ± 146,8	29,0	197,7 ± 87,3	44,1
Agosto	604,3 ± 119,2	19,7	619,9 ± 110,3	17,8	208,5 ± 52,7	25,3
Setembro	642,6 ± 166,4	25,9	633,4 ± 159,7	25,2	194,3 ± 62,2	32,0
Outubro	391,5 ± 138,8	35,5	388,4 ± 123,2	31,7	210,1 ± 54,1	25,7
Novembro	196,1 ± 49,7	25,3	244,7 ± 55,6	22,7	277,0 ± 86,5	31,2
Dezembro	178,1 ± 44,5	25,0	207,0 ± 33,8	16,3	257,6 ± 75,9	29,5
Média	315,1 ± 73,4	23,3	342,2 ± 78,8	22,7	199,8 ± 59,2	29,1

Fonte: Autores.

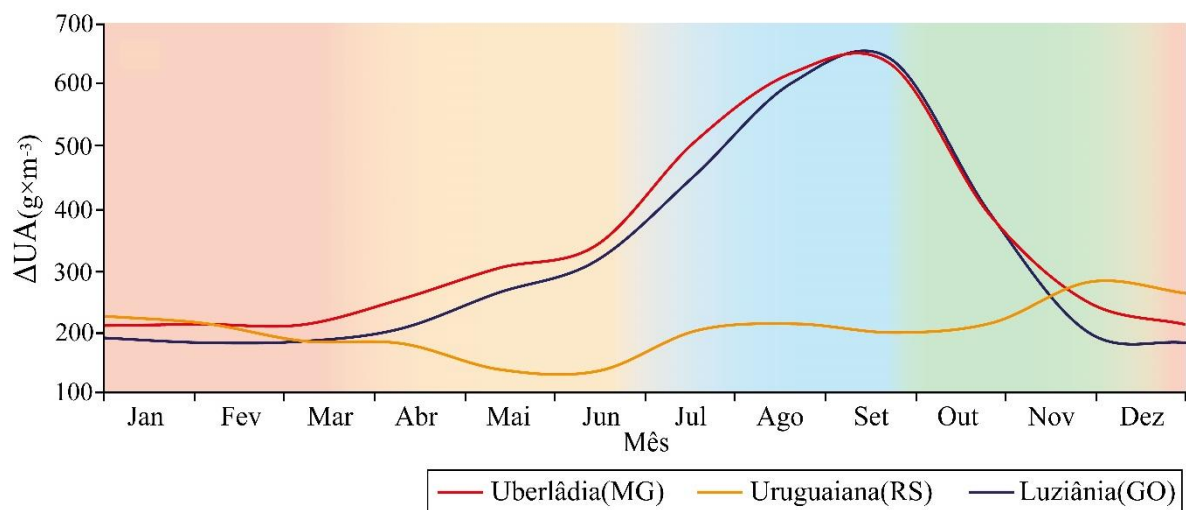
Pode-se afirmar que em Luziânia (Tabela 8) nos meses de janeiro e fevereiro foram observadas as menores  $\Delta UA$ . Posteriormente, em março observou-se aumento na  $\Delta UA$ , atingido o limite superior de  $642,6 \pm 166,4 g \cdot m^{-3}$  em setembro, e decrescendo drasticamente de outubro a dezembro. Para Uberlândia, constatou-se que a  $\Delta UA$  também apresentou valores mais baixos nos meses iniciais do ano (entre janeiro e março), atingindo o limite inferior de  $205,3 \pm 69,5 g \cdot m^{-3}$  em janeiro (Tabela 8). Após janeiro, houve aumento de  $\Delta UA$ , condição que se sustentou até setembro, quando o limite superior de  $633,4 \pm 159,7 g \cdot m^{-3}$  foi alcançado. A partir do mês de outubro, observou-se que houve redução nos valores de  $\Delta UA$ .

Em Uruguaiana, os meses de janeiro e fevereiro foram marcados por valores mais elevados de  $\Delta UA$  (Tabela 8), e observou-se comportamento decrescente de janeiro até junho, com limite inferior de  $132,0 \pm 20,0 g \cdot m^{-3}$  (junho). A partir de julho, os valores médios tenderam

a assumir novamente comportamento crescente, condição que se manteve até dezembro, sendo o pico atingido em novembro ( $277,0 \pm 86,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Com relação às médias das series temporais completas (Tabela 8), a maior média de  $\Delta\text{UA}$  foi obtida para o município de Uberlândia ( $342,2 \pm 78,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), seguido por Luziânia ( $315,1 \pm 73,4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) e Uruguaiana ( $199,8 \pm 59,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Já em relação à homogeneidade da  $\Delta\text{UA}$  em Uruguaiana foi observada a base de dados mais heterogênea ( $\text{CV} = 29,1 \%$ ), seguido por Luziânia e Uruguaiana, que tiveram valores de CV iguais a 23,3% e 22,7%, respectivamente (Tabela 8). As médias mensais  $\Delta\text{UA}$  de um ano, para os 3 municípios, estão ilustradas na Figura 10.

Figura 10 - Distribuição anual média ao decorrer das estações do ano da Variação de Umidade Absoluta ( $\Delta\text{UA}$ ) para os municípios de Luziânia (GO), Uberlândia (MG) e Uruguaiana (RS).



Fonte: Autores.

A distribuição da  $\Delta\text{UA}$  ao decorrer dos anos tendeu a apresentar comportamento relativamente constante no período de verão, para os 3 municípios (Figura 10). Posteriormente, quando se iniciou o outono, observou-se ascendência dos valores médios de  $\Delta\text{UA}$  para os municípios de Uberlândia e Luziânia, atingindo valores de  $\Delta\text{UA}$  próximos a  $400 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$  ao final de junho (Figura 10). Enquanto isso, Uruguaiana apresentou comportamento inverso no outono, decrescendo até atingir valores de  $\Delta\text{UA}$  próximos de  $100 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ . No início do inverno, Luziânia e Uberlândia permaneceram com valores mais elevados e atingiram valores próximos de  $700 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ , enquanto os valores de  $\Delta\text{UA}$  Uruguaiana também aumentaram e permaneceram constantes ( $\Delta\text{UA}$  aproximado de  $200 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Comportamento inverso ao supracitado foi observado no início da primavera em Luziânia e Uberlândia, onde foi observado decréscimo

nos valores médios de  $\Delta UA$ , enquanto em Uruguaiana foram obtidos valores médios de  $\Delta UA$  ascendentes, atingindo pico de aproximadamente  $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

## 5 CONCLUSÃO

A presença de potencialidade de uso da técnica de resfriamento evaporativo em bovinos leiteiros foi identificada para os municípios de Uberlândia (MG), Uruguaiana (RS) e Luziânia (GO). Destacando-se Uberlândia como o município de maior potencialidade média de uso da técnica de resfriamento evaporativo pela identificação do maior Índice de Temperatura e Umidade (ITU) médio e a maior Capacidade de Redução de Carga Térmica Radiante (CAP) média.

Pelo ITU foi identificada a presença de condição termicamente estressora, principalmente no período de verão, nos 3 municípios. Vale ressaltar que, em termos médios, Uberlândia apresentou o maior ITU (72,95), seguido de Luziânia (70,40) e Uruguaiana (66,38).

Em Uberlândia e Luziânia foram identificados valores de CAP mais elevados nos períodos de inverno. Em contrapartida, Uruguaiana apresentou a CAP mais elevada no período de primavera. Além disso, Uberlândia obteve a maior CAP média ( $57,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), seguido de Luziânia ( $54,4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ) e Uruguaiana ( $33,40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).

A Variação Teórica de Umidade Absoluta ( $\Delta U A$ ) em termos médios foi superior em Uberlândia ( $342,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), seguido de Luziânia ( $342,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) e Uruguaiana ( $199,8 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). Além disso, notou-se que a  $\Delta U A$  atingiu seus limites superiores durante o inverno em Luziânia e Uberlândia e no período de primavera em Uruguaiana.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, P. et al. ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE GLOBO NEGRO A PARTIR DA TEMPERATURA DE BULBO SECO. **Engenharia na agricultura**, v. 19, p. 557–563, 2011.
- ALMEIDA, G. L. P. DE et al. Uso do sistema de resfriamento adiabático evaporativo no conforto térmico de vacas da raça girolando. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 7, p. 754–760, 2011.
- ANDRADE, R. R. et al. Understanding Compost-Bedded Pack Barn Systems in Regions with a Tropical Climate: A Review of the Current State of the Art. **Animals**, v. 14, n. 12, 2024.
- ARIAS, R. A.; MADER, T. L. Evaluation of four thermal comfort indices and their relationship with physiological variables in feedlot cattle. **Animals**, v. 13, n. 7, p. 1169, mar. 2023.
- ARMSTRONG, D. V. Heat Stress Interaction with Shade and Cooling. **Journal of Dairy Science**, v. 77, n. 7, p. 2044–2050, 1994.
- AZEVEDO, P. R. M. DE. **Introdução à estatística**. 3. ed. Natal (RN): edufrn, 2016.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: Conforto animal**. 2. ed. Viçosa: Editora UFV, 2010.
- BARN, C. P. et al. Mapping of the Thermal Microenvironment for Dairy Cows in. 2022.
- BARNABÉ, J. M. C. et al. Thermal comfort and performance Holstein/Gir calves housed in individual shelters with different covers. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 481–488, 2015.
- BLACK, R. A. et al. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v. 96, n. 12, p. 8060–8074, 2013.
- CASTRO JÚNIOR, S. L.; SILVA, I. J. O. The specific enthalpy of air as an indicator of heat stress in livestock animals. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 2, p. 149–161, 2021.
- CLAUS BORGNAKKE, R. E. S. **Fundamentos da Termodinâmica**. 8. ed. [s.l: s.n.].
- D. E. BUFFINGTON et al. Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 0711–0714, 1981.
- DAMASCENO, F. A. et al. 3D Cfd Analysis of Natural Ventilation in Reduced Scale Model of Compost Bedded Pack Barn for Dairy Cows. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 22, p. 1–17, 2020.
- DAVIDSON, B. D. et al. Late-gestation heat stress abatement in dairy heifers promotes thermoregulation and improves productivity. **Journal of Dairy Science**, v. 104, n. 2, p. 2357–2368, 2021.

- DIKMEN, S.; HANSEN, P. J. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? **Journal of Dairy Science**, v. 92, n. 1, p. 109–116, jan. 2009.
- DRWENCKE, A. M. et al. Innovative cooling strategies: Dairy cow responses and water and energy use. **Journal of Dairy Science**, v. 103, n. 6, p. 5440–5454, 2020.
- ESMAY, M. L. Esmay, M. L. Principles of animal environment. Westport: The Avi, 1978. **Westport: AVI, 1982.**, v. 2, p. 358, 1982.
- ESTAT, A. **Manual de Análise de Dados: Estatística e Machine Learning com Excel®, SPSS®, Stata®, R® e Python.** 2. ed. [s.l.] GEN LTC, 2024.
- FÁVERO, L. P. **Manual de Análise de Dados: Estatística e Machine Learning com Excel®, SPSS®, Stata®, R® e Python®.** 1. ed. São Paulo: GEN LTC, 2017.
- FERREIRA, F. et al. Parâmetros fisiológicos de bovinos cruzados submetidos ao estresse calórico. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 58, n. 5, p. 732–738, 2006.
- FOROUSHANI, S.; AMON, T. A graphical method for assessing the effectiveness of evaporative cooling in naturally ventilated dairy barns. **Biosystems Engineering**, v. 218, n. 2017, p. 23–30, 2022.
- FOURNEL, S.; OUELLET, V.; CHARBONNEAU, É. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review. **Animals**, v. 7, n. 5, 2017.
- GAULY, M.; AMMER, S. **Review: Challenges for dairy cow production systems arising from climate changes.** Animal. **Anais...**Cambridge University Press, mar. 2020.
- GRITSENKO, V. A.; NIKULIN, V. V. **Igusa modular forms and “the simplest” Lorentzian Kac-Moody algebras.** **Sbornik Mathematics**, 1996.
- HIDALGO, J. et al. Feedlot pens with greenhouse roofs improve beef cattle performance in temperate weather. **Translational Animal Science**, v. 6, n. 2, p. 1–10, 2022.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção de Leite.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br>>.
- INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia.** Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/>>.
- JI, B. et al. Modelling of heat stress in a robotic dairy farm. Part 1: Thermal comfort indices as the indicators of production loss. **Biosystems Engineering**, v. 199, p. 27–42, nov. 2020.
- KIC, P. Influence of External Thermal Conditions on Temperature–Humidity Parameters of Indoor Air in a Czech Dairy Farm during the Summer. **Animals**, v. 12, n. 15, 2022.
- MADER, T. L.; DAVIS, M. S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v. 84, n. 3, p. 712–719, abr. 2006.

- MAGALHÃES, C. A. S. et al. Improvement of thermal comfort indices in agroforestry systems in the southern Brazilian Amazon. **Journal of Thermal Biology**, v. 91, n. May, 2020.
- MAHIEU, A. et al. Performance of particleboards based on annual plant byproducts bound with bio-adhesives. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 107, n. March, p. 102847, 2021.
- MAPA. **Ministério da Agricultura e Pecuária. Mapa do Leite: Políticas Públicas e Privadas para o Leite.** Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/portal-do-leite/mapa-do-leite/>>.
- OLIVEIRA, A. C. F. C. **Transferência de Calor: Um Guia para a Resolução de Problemas Práticos.** 1. ed. Porto: Author, 2022.
- PANTOJA, M. H. DE A. et al. Influence of successive heat waves on the thermoregulatory responses of pregnant and non-pregnant ewes. **Journal of Thermal Biology**, v. 111, n. July 2022, 2023.
- PAUL ROGÉRIO GARCIA. Galpão freestall com sistema de resfriamento evaporativo e ventilação cruzada: desempenho térmico, zootécnico e o nível de bem-estar animal. **Escola Superior de agricultura Luiz de Queiroz- USP**, 2017.
- PEZZOPANE, J. R. M. et al. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of Thermal Biology**, v. 79, n. November 2018, p. 103–111, 2019.
- POLSKY, L.; VON-KEYSERLINGK, M. A. G. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. **Journal of Dairy Science**, v. 100, n. 11, p. 8645–8657, nov. 2017.
- RENAUDEAU, D. et al. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. **Animal**, v. 6, n. 5, p. 707–728, jan. 2012.
- REUSCHER, K. J. et al. Effect of different air speeds at cow resting height in freestalls on heat stress responses and resting behavior in lactating cows in Wisconsin. **Journal of Dairy Science**, v. 106, n. 12, p. 9552–9567, 2023.
- REUSCHER, K. J. et al. Consistent stall air speeds in commercial dairy farms are associated with less variability in cow lying times. **Frontiers in Animal Science**, v. 5, n. August, p. 1–14, 2024.
- SIMÕES-MOREIRA, J. R.; NETO, A. H. **Fundamentos e aplicações da psicrometria.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2019.
- SUL, G. D. O.; SECCO, T. R. DE LEITE NO PERÍODO PRÉ-PARTO. p. 1–58, 2022.
- THOM, E. C. The Discomfort Index. **Weatherwise**, v. 12, n. 2, p. 57–61, abr. 1959.
- THOM; E.C. Cooling degress-day air conditioning, heating, and ventilating. Transactions of

the ASHRAE. **St. Joseph**, v. 55, p. 65–72, 1959.

TOLEDO, I. M.; DAHL, G. E.; DE VRIES, A. Dairy cattle management and housing for warm environments. **Livestock Science**, v. 255, n. October 2021, p. 104802, 2022.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Umidade do ar. **Meteorologia e Climatologia**, v. 2, p. 449, 2006.

VIANELLO, R.; ALVES, A. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa: UFV, 2012.

XAVIER, T. C. et al. Análise comparativa de índices de conforto térmico em Viçosa-MG, Zona da Mata Mineira. **Geo UERJ**, n. 41, p. e54585, 2022.

YAN, G. et al. Developing a new thermal comfort prediction model and web-based application for heat stress assessment in dairy cows. **Biosystems Engineering**, v. 214, p. 72–89, fev. 2022.