

**CARLOS EDUARDO ALVES OLIVEIRA**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DA  
CAMA EM *COMPOST BARN* ABERTO EM CONDIÇÕES DE INVERNO NO  
BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

Coorientadores: Fernanda Campos de Sousa  
Flávio Alves Damasceno  
Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Matteo Barbari

**VIÇOSA – MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

O48d  
2022

Oliveira, Carlos Eduardo Alves, 1995-

Distribuição espacial e temporal de variáveis ambientais e da cama em *Compost Barn* aberto em condições de inverno no Brasil / Carlos Eduardo Alves Oliveira. – Viçosa, MG, 2022.  
1 dissertação eletrônica (179 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexo.

Orientador: Ilda de Fátima Ferreira Tinoco.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.223>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Bovinos de leite - Instalações - Estatísticas.
2. Ventilação. I. Tinoco, Ilda de Fátima Ferreira, 1957-.
- II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.
- III. Título.

CDD 22. ed. 636.2142

**CARLOS EDUARDO ALVES OLIVEIRA**

**DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE VARIÁVEIS AMBIENTAIS E DA  
CAMA EM *COMPOST BARN* ABERTO EM CONDIÇÕES DE INVERNO NO  
BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2022.

Assentimento:

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Eduardo Alves Oliveira  
Autor

  
\_\_\_\_\_  
Ilda de Fátima Ferreira Tinôco  
Orientadora

*Aos homens e mulheres do campo, que se dedicam  
e abastecem nossas mesas todos os dias.*

*OFEREÇO!*

*A Deus,*

*Pela abençoada família que meu deus  
e por ser minha luz e meu guia  
em todos os momentos.*

*DEDICO!*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos concedidas, por ser minha luz durante esta caminhada, e por me ajudar a superar todos os obstáculos. És o meu refúgio, Senhor!

Aos meus pais, Verbene Bezerra e Lisboa Oliveira, e as minhas irmãs Carla Oliveira e Débora Oliveira, pelo carinho e apoio incondicional, e seus exemplos de amor, caráter, humildade e simplicidade. Muito obrigado por me ajudarem a alcançar este sonho. Sou eternamente grato a vocês!

À minha esposa, Ana Isabel, por todo o amor, compreensão, cumplicidade, paciência, confiança e apoio incondicional em todos os momentos. Obrigado por cuidar tão bem de mim e estar sempre ao meu lado!

Aos meus avós maternos, Maria Alves e Eduardo Bezerra, por seus exemplos de honestidade, simplicidade e caráter. Vocês são a base forte de nossa família!

Aos meus avós paternos, Ana Rosa (*in memoriam*) e Manoel Oliveira (*in memoriam*), por seus exemplos de simplicidade e amor. Tenho certeza de que, de onde estiverem, estão cuidando e torcendo por todos nós, seus entes queridos!

Aos tios (as), primos (as), demais familiares e amigos, pelas orações, torcida, amizade e apoio constante. Esta conquista também é de todos vocês!

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do mestrado neste ambiente de tão rico aprendizado.

Ao Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais (Ambiagro), por ser minha segunda casa em Viçosa.

Especial agradecimento à minha orientadora, Prof.<sup>a</sup> Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, pela oportunidade, sábias orientações e ensinamentos, confiança, exemplo profissional e pessoal, e valorosa amizade construída. Tens a minha eterna admiração!

À Prof.<sup>a</sup> Fernanda Campos de Sousa, pela coorientação, solicitude, confiança, sugestões para a melhoria deste trabalho e amizade construída.

Ao Prof. Flávio Alves Damasceno, pelas orientações, ensinamentos e contribuições. Obrigado pela confiança e por me motivar a desenvolver um trabalho de qualidade. Tens a minha eterna gratidão!

Ao Prof. Gabriel Araújo e Silva Ferraz, pela coorientação, ensinamentos, auxílio nas análises geoestatísticas, valorosas sugestões para a melhoria deste trabalho, bem como amizade, que se estende desde a graduação.

Ao Prof. Matteo Barbari, pela coorientação, ensinamentos e sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos Profs. Cecília de Fátima Souza Ferreira, Fernando da Costa Baêta e Valmir Sartor, pelo conhecimento transmitido, palavras de apoio e carinho, ensinamentos, contribuições e amizade construída ao longo do mestrado.

Aos colegas do Ambíagro, Charles Paranhos, Daniele Soares, Erika Cruz, Fabiane Maciel, Harold Torres, Hiago Zanetoni, João Antônio, Leonardo França, Maria Angela e Victor Crespo, pelos momentos de profissionalismo e descontração.

À Rafaella Andrade, pela amizade, apoio, disponibilidade, recomendações, orientações e por me abrir as portas para realização deste estudo. Muito obrigado!

Aos Professores Letícia Freitas e Carlos Gutemberg, pela excepcional ajuda na elaboração e disponibilidade em colaborar em todas as etapas do projeto de mestrado.

Aos colegas João Antônio e Leonardo França, pela amizade e parceria durante a condução do experimento de campo.

Aos estagiários Ana Sabino, Dezirre Costa, Jocássia Reis, Marcos Castro, Thais Mello, Thauane Soares, Thiago Braga e Túlio Mariano, pela disponibilidade e comprometimento durante a montagem e condução do experimento. Muito obrigado!

Aos amigos da República CCR, Carlos Domiciano e Rafael Petruceli, pela amizade, bom convívio e inúmeros momentos bons vividos durante esta etapa.

Aos amigos que o PPGEA/UFV me deu, Poliana Bandeira e Pedro Rodrigues, que me ajudaram de várias maneiras durante as disciplinas e condução de experimento.

Aos amigos que me Viçosa me deu, Khalil Lacerda, Raissa Nascimento e Tarcilany Santana, pela amizade e inúmeros momentos bons compartilhados.

À Fazenda Nô da Silva, seus proprietários, familiares e funcionários, pela disponibilidade para realização do trabalho e amizade construída.

Aos membros da banca de defesa, pelo tempo despendido para leitura e valorosas contribuições para melhoria deste trabalho.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado (processo 132050/2020-0), e a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto.

Aos professores e funcionários do DEA/UFV, pelas inúmeras contribuições.

Enfim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que eu alcançasse mais esta conquista em minha vida, muito obrigado!

*“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso.”*

*Albert Einstein*

## BIOGRAFIA

CARLOS EDUARDO ALVES OLIVEIRA, filho de Antônio Lisboa Oliveira e Antônia Verbene Alves Bezerra, nasceu em 12 de maio de 1995, em Quiterianópolis, Ceará, Brasil.

Em agosto de 2013, iniciou a graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Mato Grosso, Campus Universitário de Rondonópolis (UFMT/CUR), onde foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC/UFMT) e Monitoria (PM/UFMT).

Em agosto de 2015, transferiu a graduação para o curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras (UFLA), onde foi bolsista de Iniciação Científica (PIBIC/UFLA e PIBIC/CNPq) e do Programa de Educação Tutorial (PET/MEC).

Em dezembro de 2018, submeteu-se à defesa de seu trabalho de conclusão de curso de graduação, intitulado “**Distribuição espacial do ambiente térmico, ruído, iluminância e variáveis da cama em instalações *Compost Barn***”, sob orientação do Prof. Dr. Flávio Alves Damasceno.

Em agosto de 2019, graduou-se Bacharel em Engenharia Agrícola pela UFLA. Neste mesmo ano, iniciou a vida profissional como Trainee de Mecanização Agrícola na SLC Agrícola S/A, empresa onde realizou estágio curricular no primeiro semestre de 2019.

Em março de 2020 iniciou o mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (PPGEA/UFV), na área de concentração de Construções Rurais e Ambiente (linha de pesquisa Ambiente, Eng. e Arquit. de Sistemas Agríc. e Agroindustriais na Produção Animal e Vegetal).

Em fevereiro de 2022, submeteu-se à defesa de sua dissertação de mestrado, intitulada “**Distribuição espacial e temporal de variáveis ambientais e da cama em *Compost Barn* aberto em condições de inverno no Brasil**”, sob orientação da Prof.<sup>a</sup> Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.

## RESUMO

OLIVEIRA, Carlos Eduardo Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Distribuição espacial e temporal de variáveis ambientais e da cama em *Compost Barn* aberto em condições de inverno no Brasil.** Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Coorientadores: Fernanda Campos de Sousa, Flávio Alves Damasceno, Gabriel Araújo e Silva Ferraz e Matteo Barbari.

No Brasil, atualmente é observado elevado crescimento do sistema de confinamento de bovinos leiteiros conhecido como *Compost Barn (CB)*, porém há carência de informações e orientações detalhadas, relativas à aplicabilidade, funcionalidade e adequação de manejos às condições, tipologias construtivas e situação climática do país. Deste modo, objetivou-se com o presente estudo avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial de variáveis térmico-ambientais e da cama em relação a área interna de um sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva (*CBAVP*). O estudo foi conduzido durante o período de inverno, em uma instalação comercial para bovinos de leite em produção, em sistema *CBAVP* localizado na região da Zona da Mata, no Estado de Minas Gerais, maior produtor de leite do país. Foram levantados os principais aspectos que tangem o uso de sistemas *CB* no Brasil, abordando surgimento, conceito, tipologia construtiva, materiais e manejos aplicados a cama, acondicionamento térmico e avaliação do ambiente neste tipo de instalação para as especificações climáticas do país. Com base nos aspectos levantados, o estudo foi conduzido em nível de campo, sendo avaliados distribuição espacial e temporal das condições térmico-ambientais e da cama, por meio do uso de técnicas de estatística descritiva e geoestatística. Verificou-se que, na maioria dos dias, os valores médios de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) no interior da instalação mantiveram-se dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação ( $4,0 \leq t_{bs} < 24,0$  °C), enquanto a umidade relativa do ar (UR) esteve acima da faixa preconizada como adequada ( $30,0 \leq UR < 75,0\%$ ). Porém, os resultados de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da Entalpia Específica do Ar (H) indicaram condições adequadas de conforto térmico ao longo de todo o dia. Por meio de técnicas de geoestatística, verificou-se ocorrência de dependência espacial forte para todas as variáveis e índices avaliados, viabilizando aplicar técnicas de interpolação por krigagem e gerar mapas de distribuição espacial. A partir dos mapas gerados, foi possível observar que as variáveis e índices do ambiente térmico ( $t_{bs}$ , UR, ITU e H) apresentavam variabilidade espacial, mas em níveis dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros. Os níveis mais elevados de  $t_{bs}$ , ITU e H foram registrados no período tarde, na face Noroeste da instalação ( $t_{bs} = 23,2$  °C,

ITU = 69,7 e H = 50,9 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), que recebia incidência de radiação solar direta. Para velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ), foi verificada ocorrência de distribuições não uniformes, com magnitudes abaixo do recomendado pela literatura (1,8 m·s<sup>-1</sup>). Em relação a qualidade da cama, as variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ), temperatura da cama na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e umidade da cama na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ) apresentaram elevada variabilidade espacial ao longo da área de cama, ao passo os atributos pH da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e pH da cama na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ) tiveram baixa variação (8,2–9,7). Na camada superficial, a temperatura da cama foi inferior a 20,0 °C (14,1 a 19,6 °C), indício de que estava confortável para que os animais permanecessem deitados, mas os níveis de  $U_{C-sup}$  registrados na região próxima ao corredor de alimentação foram superiores a 60,0%, condição que pode ter gerado problemas de sanidade e qualidade do leite. A 0,2 m, foram observados níveis de  $t_{C-20}$  predominantemente abaixo de 40,0 °C (87,0% da área) e de  $U_{C-20}$  acima de 60,0% (49,0% da área) em alguns locais (regiões periféricas e próximo ao corredor de alimentação), indícios de que o processo de decomposição do material de cama estava ocorrendo de forma lenta, conforme retratado pelos elevados valores de  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  ( $> 9,0$ ). De modo geral, conclui-se que o sistema *CBAVP* possui potencial de uso para condições climáticas brasileiras. Contudo, é necessário adequar o sistema de ventilação e o manejo da cama, para possibilitar a manutenção das variáveis térmico-ambientais e de qualidade da cama dentro da faixa recomendada para este tipo de instalação.

Palavras-chave: Bovinos de leite. Conforto térmico. Geoestatística. Sistemas de confinamento. Ventilação.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Carlos Eduardo Alves, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2022. **Spatial and temporal distribution of environmental and bedding variables in open Compost Barn in winter conditions in Brazil.** Advisers: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Co-advisers: Fernanda Campos de Sousa, Flávio Alves Damasceno, Gabriel Araújo e Silva Ferraz and Matteo Barbari.

In Brazil, there is currently a high growth of the confinement system of dairy cattle known as Compost Barn (CB), but there is a lack of detailed information and guidance, regarding the applicability, functionality, and adequacy of management to the conditions, constructive typologies, and climatic situation of the country. Thus, the objective of the present study was to evaluate and characterize the dependence and spatial distribution of thermal-environmental and bed variables in relation to the internal area of a facility for confinement of dairy cattle in production, in an open Compost Barn system semi-climatized by positive pressure ventilation (CBAVP). The study was conducted during the winter period, in a commercial facility for dairy cattle in production, in a CBAVP system located in the Zona da Mata region, in the State of Minas Gerais, the largest milk producer in the country. The main aspects regarding the use of CB systems in Brazil were raised, addressing the emergence, concept, constructive typology, materials, and management applied to the bed, thermal conditioning, and environmental assessment in this type of installation for the country's climatic specifications. Based on the aspects raised, the study was conducted at the field level, being evaluated dependence and spatial and temporal distribution of thermal-environmental conditions and bedding, using descriptive statistics and geostatistics techniques. It was found that, on most days, the average values of dry-bulb temperature ( $t_{bs}$ ) inside the facility remained within the thermal comfort range for lactating dairy cattle ( $4.0 \leq t_{bs} < 24.0$  °C), while the relative humidity (UR) was above the recommended range as adequate ( $30.0 \leq UR < 75.0\%$ ). However, the results of Temperature and Humidity Index (ITU) and Specific Enthalpy of Air (H) indicated adequate conditions of thermal comfort throughout the day. Using geostatistical techniques, strong spatial dependence was observed for all variables and indices evaluated, making it possible to apply kriging interpolation techniques and generate maps of spatial distribution. From the generated maps, it was possible to observe that the variables and indices of the thermal environment ( $t_{bs}$ , UR, ITU and H) presented spatial variability, but at levels within the range of thermal comfort for dairy cattle. For air speed at a height of 1.5 m ( $v_{ar,M}$ ) and air speed at bed level ( $v_{ar,C}$ ), non-uniform distributions were observed, with magnitudes below the recommended by the literature (1.8

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Regarding bed quality, the variables bed surface temperature ( $t_{\text{C-sup}}$ ), bed temperature at a depth of 0.2 m ( $t_{\text{C-20}}$ ), bed surface moisture ( $U_{\text{C-sup}}$ ) and bed moisture at a depth of 0.2 m ( $U_{\text{C-20}}$ ) showed high spatial variability along the bedding area, while the bed surface pH ( $\text{pH}_{\text{C-sup}}$ ) and bed pH at a depth of 0.2 m ( $\text{pH}_{\text{C-20}}$ ) had low variation (8.2–9.7). In the surface layer, the bed temperature was below 20.0 °C (14.1 to 19.6 °C), an indication that it was comfortable for the animals to remain lying down, but the  $U_{\text{C-sup}}$  levels recorded in the region close to the feeding aisle were higher than 60.0%, condition that may have generated problems with the herd's health and the milk's quality. At 0.2 m,  $t_{\text{C-20}}$  levels were observed predominantly below 40.0 °C (87.0% of the area) and  $U_{\text{C-20}}$  levels above 60.0% (49.0% of the area) in some regions (peripheral regions and close to the feed alley). These results indicates that the process of decomposition of the bed material was occurring slowly, as shown by the high values of  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  and  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  ( $> 9.0$ ). In general, it is concluded that the CBAVP system has potential for use in Brazilian climatic conditions. However, it is necessary to adapt the ventilation system and the management of the bed, to allow the maintenance of the thermal-environmental variables and the quality of the bed within the recommended range for this type of installation.

Keywords: Dairy cattle. Thermal comfort. Geostatistics. Confinement systems. Ventilation.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1. Evolução da temperatura em processos de compostagem e semi-compostagem (processo que ocorre em sistemas <i>Compost Barn</i> ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 35 |
| Figura 2.2. Equipamentos primários utilizados para revolvimento da cama em sistemas <i>Compost Barn</i> : grade de discos (A), enxada rotativa (B) e escarificador (C) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 45 |
| Figura 2.3. Inovações em equipamentos utilizados para revolvimento da cama em sistemas <i>Compost Barn</i> : enxada rotativa ERCB-2000 (A), misturador MCBF-2400 (B), escarificador de cama SME-2000 (C), revolvedor de cama STIR-2000 (D), enxada rotativa SER-2000/2500 CB (E), enxada rotativa ERP-175/200/225/250/275 BVRCG (F), enxada rotativa ROTOPEC-2000 (G), misturador de cama Avassalador MC 2000 PLUS (H) e revolvedor de <i>Compost Barn</i> Vimaq (I) ..... | 48 |
| Figura 2.4. Representação esquemática dos deslocamentos naturais de massas de ar em sistemas <i>Compost Barn</i> devido as diferenças de pressão (A) e de temperatura (B) entre dois pontos considerados .....                                                                                                                                                                                                                                                             | 54 |
| Figura 2.5. Representação e exemplos de sistemas <i>Compost Barn</i> com ventilação por pressão positiva dos tipos baixo volume e alta rotação ( <i>LVHS</i> ), com ventiladores instalados na longitudinal (A) e transversal (B), e alto volume e baixa rotação ( <i>HVLS</i> ) (C) .....                                                                                                                                                                                 | 56 |
| Figura 2.6. Sistema <i>Compost Barn</i> fechado com ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático: representação esquemática do escoamento de ar (A) e instalação fechada em Cajuri – MG, com destaque para a placa de resfriamento adiabático evaporativo (B) e exaustores (C) .....                                                                                                                                                               | 58 |
| Figura 3.1. Representação esquemática, em planta baixa (A) e corte transversal (B), do sistema <i>Compost Barn</i> aberto onde foram coletados os dados experimentais .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 84 |
| Figura 3.2. Representação esquemática, em planta baixa (A) e corte transversal (B), dos pontos de coleta de dados microclimáticos no interior do sistema <i>Compost Barn</i> aberto .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 87 |
| Figura 3.3. Curvas de valores médios, mínimos e máximos absolutos de temperatura de bulbo seco do ar – $t_{bs}$ (A) e umidade relativa do ar – UR (B) ao longo dos dias do período experimental de inverno, nos ambientes interno e externo do sistema <i>Compost Barn</i> aberto .....                                                                                                                                                                                    | 92 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.4. Perfis médios horários, com desvio padrão, de temperatura de bulbo seco do ar – $t_{bs}$ (A) e umidade relativa do ar – UR (B) ao longo do dia, nos ambientes interno e externo da instalação, durante o período de inverno .....                                           | 95  |
| Figura 3.5. Perfis médios horários de Índice de Temperatura e Umidade – ITU (A) e Entalpia Específica do Ar – H (B) ao longo do dia, nos ambientes interno e externo da instalação, durante o período de inverno .....                                                                  | 96  |
| Figura 3.6. Distribuição espacial de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em °C): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D) .....                                   | 103 |
| Figura 3.7. Distribuição espacial de umidade relativa do ar (UR, em %): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D) .....                                                     | 106 |
| Figura 3.8. Distribuição espacial do Índice de Temperatura e Umidade (ITU): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D) .....                                                 | 108 |
| Figura 3.9. Distribuição espacial da Entalpia Específica do Ar (H, em $\text{kJ}\cdot\text{kg}$ de ar seco <sup>-1</sup> ): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D) ..... | 110 |
| Figura 4.1. Representação esquemática da instalação <i>Compost Barn</i> onde foram coletados os dados experimentais: planta baixa com pontos de coleta (A) e corte transversal (B) .....                                                                                                | 122 |
| Figura 4.2. Distribuição espacial de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B) .....                                                                                                                         | 129 |
| Figura 4.3. Distribuição de frequência de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B) .....                                                                                                                    | 132 |
| Figura 4.4. Distribuição espacial de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B) .....                                                                                                                           | 133 |
| Figura 4.5. Distribuição de frequência de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B) .....                                                                                                                      | 134 |
| Figura 5.1. Representação esquemática do sistema <i>Compost Barn</i> onde foram coletados os dados: planta baixa com pontos de coleta (A) e corte transversal (B) .....                                                                                                                 | 145 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 5.2. Imagens da instalação <i>Compost Barn</i> aberta com ventilação por pressão positiva, com destaque para os ventiladores de baixo volume e alta rotação (A) e revolvimento do material de cama (B) .....                                                                                                                                                                                        | 146 |
| Figura 5.3. Curvas de valores médios horários, com desvio padrão, de temperatura de bulbo seco do ar e umidade relativa do ar ao longo do dia no interior da instalação .....                                                                                                                                                                                                                              | 152 |
| Figura 5.4. Semivariogramas ajustados para as variáveis temperatura da cama na superfície – $t_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $t_{C-20}$ (B), umidade da cama na superfície – $U_{C-sup}$ (C) e na profundidade de 0,2 m – $U_{C-20}$ (D), pH da cama na superfície – $pH_{C-sup}$ (E) e na profundidade de 0,2 m – $pH_{C-20}$ (F), e velocidade do ar ao nível da cama – $v_{ar,C}$ (G) ..... | 154 |
| Figura 5.5. Distribuição espacial de temperatura da cama na superfície – $t_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $t_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 156 |
| Figura 5.6. Distribuição de frequência de temperatura da cama na superfície – $t_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $t_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 160 |
| Figura 5.7. Distribuição espacial de umidade da cama na superfície – $U_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $U_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                                                     | 161 |
| Figura 5.8. Distribuição de frequência de umidade da cama na superfície – $U_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $U_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                                                | 163 |
| Figura 5.9. Distribuição espacial de potencial hidrogeniônico da cama na superfície – $pH_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $pH_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                                  | 165 |
| Figura 5.10. Distribuição de frequência de potencial hidrogeniônico da cama na superfície – $pH_{C-sup}$ (A) e na profundidade de 0,2 m – $pH_{C-20}$ (B) .....                                                                                                                                                                                                                                            | 167 |
| Figura 5.11. Distribuição espacial (A) e de frequência (B) de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 169 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1. Condições médias de temperatura e umidade da cama na camada aerobiamente ativa em sistemas <i>Compost Barn</i> retratadas por pesquisadores em estudos conduzidos no Brasil .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 37  |
| Tabela 2.2. Valores de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em °C) e umidade relativa do ar (UR, em %) que delimitam as faixas de conforto térmico e termoneutralidade para bovinos leiteiros .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 61  |
| Tabela 3.1. Classificação de conforto térmico para bovinos leiteiros da raça holandesa em fase de lactação .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 88  |
| Tabela 3.2. Análise descritiva dos valores médios horários das variáveis e índices temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em °C), umidade relativa do ar (UR, em %), Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia (H, em $\text{kJ}\cdot\text{kg}$ de ar $\text{seco}^{-1}$ ) no interior da instalação .....                                                                                                                                                                                           | 98  |
| Tabela 3.3. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para temperatura de bulbo seco ( $t_{bs}$ ), umidade relativa (UR), Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia Específica do ar (H) .....                                                                                                                                                                                                                                                                        | 101 |
| Tabela 4.1. Análise descritiva dos valores médios das variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) no interior da instalação <i>Compost Barn</i> aberta durante o período de inverno .....                                                                                                                                                                                 | 127 |
| Tabela 4.2. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para os valores médios de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ ) e velocidade do ar nível da cama ( $v_{ar,C}$ ) no interior do sistema <i>Compost Barn</i> aberto durante o período de inverno .....                                                                                                                                                                                                      | 127 |
| Tabela 5.1. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para os valores médios das variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,20 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,20 m ( $U_{C-20}$ ), pH da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,20 m ( $pH_{C-20}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ), durante o período experimental de inverno ..... | 153 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                 |                                                                |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| a                               | Alcance                                                        |
| a'                              | Alcance prático                                                |
| Ass.                            | Assimetria                                                     |
| C                               | Carbono                                                        |
| C <sub>A</sub>                  | Casca de arroz                                                 |
| C <sub>Am</sub>                 | Casca de amendoim                                              |
| C <sub>C</sub>                  | Casca de café                                                  |
| CCS                             | Contagem de Células Somáticas                                  |
| CB                              | <i>Compost Barn</i>                                            |
| CBAVP                           | <i>Compost Barn</i> aberto ventilação por pressão positiva     |
| CFD                             | Fluidodinâmica Computacional                                   |
| C/N                             | Relação carbono nitrogênio                                     |
| CO <sub>2</sub>                 | Dióxido de carbono                                             |
| cv                              | Cavalo vapor                                                   |
| CV                              | Coefficiente de variação                                       |
| Curt.                           | Curtose                                                        |
| C <sub>0</sub>                  | Efeito pepita                                                  |
| C <sub>1</sub>                  | Contribuição                                                   |
| C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub> | Patamar                                                        |
| DP                              | Desvio padrão                                                  |
| DP <sub>M</sub>                 | Desvio padrão do erro médio                                    |
| DP <sub>R</sub>                 | Desvio padrão do erro reduzido                                 |
| E <sub>M</sub>                  | Erro médio                                                     |
| E <sub>R</sub>                  | Erro reduzido                                                  |
| FAO                             | <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> |
| FS                              | <i>Free Stall</i>                                              |
| GDE                             | Grau de dependência espacial                                   |
| H                               | Entalpia Específica do Ar                                      |
| h                               | Hora                                                           |
| <i>h</i>                        | Distância de separação das observações experimentais           |
| H <sub>Int-Máx</sub>            | Entalpia Específica do Ar interna máxima                       |

|                 |                                                     |
|-----------------|-----------------------------------------------------|
| $H_{Int-Min}$   | Entalpia Específica do Ar interna mínima            |
| <i>HVLS</i>     | <i>High Volum and Low Speed</i>                     |
| ICTs            | Índices de Conforto Térmico                         |
| ITU             | Índice de Temperatura e Umidade                     |
| $ITU_{Int-Máx}$ | Índice de Temperatura e Umidade interno máximo      |
| $ITU_{Int-Min}$ | Índice de Temperatura e Umidade interno mínimo      |
| LCs             | Linhas de coleta                                    |
| <i>LH</i>       | <i>Loose Housing</i>                                |
| LIC             | Limite inferior de conforto térmico                 |
| LSC             | Limite superior de conforto térmico                 |
| <i>LVHS</i>     | <i>Low Volum and High Speed</i>                     |
| m               | Metro                                               |
| $M_C$           | Material de cama                                    |
| min             | Minutos                                             |
| $M_M$           | Maravalha de madeira                                |
| N               | Nitrogênio                                          |
| $N(h)$          | Número de pares experimentais                       |
| $NH_3$          | Amônia                                              |
| NR              | Norma Regulamentadora                               |
| OLS             | Método dos Quadrados Mínimos Ordinários             |
| $O_2$           | Oxigênio                                            |
| P               | Pressão                                             |
| Pa              | Pascal                                              |
| $P_{AC}$        | Profundidade em que foi realizada a análise da cama |
| PB              | Pressão barométrica                                 |
| pH              | Potencial hidrogeniônico                            |
| PO              | Puro de origem                                      |
| RAE             | Resfriamento adiabático evaporativo                 |
| REML            | Método da Máxima Verossimilhança Restrita           |
| rpm             | Rotações por minuto                                 |
| $S_M$           | Serragem de madeira                                 |
| SRAE            | Sistema de resfriamento adiabático evaporativo      |
| SV              | Sentido da ventilação                               |

|                         |                                                    |
|-------------------------|----------------------------------------------------|
| $t_{bs}$                | Temperatura de bulbo seco do ar                    |
| $t_{bs-Ext}$            | Temperatura de bulbo seco do ar externa média      |
| $t_{bs,Int-Máx}$        | Temperatura de bulbo seco do ar interna máxima     |
| $t_{bs,Int-Mín}$        | Temperatura de bulbo seco do ar interna mínima     |
| $t_c$                   | Temperatura da cama                                |
| $t_{c-sup}$             | Temperatura da cama na superfície                  |
| $t_{c-20}$              | Temperatura da cama na profundidade de 0,20 m      |
| <i>TS</i>               | <i>Tie Stall</i>                                   |
| $U_c$                   | Umidade da cama                                    |
| $U_{c-sup}$             | Umidade da cama na superfície                      |
| $U_{c-20}$              | Umidade da cama na profundidade de 0,20 m          |
| $UR$                    | Umidade relativa do ar                             |
| $UR_{Ext}$              | Umidade relativa do ar externa média               |
| $UR_{Int,Máx}$          | Umidade relativa do ar interna máxima              |
| $UR_{Int,Mín}$          | Umidade relativa do ar interna mínima              |
| $V_{ar}$                | Velocidade do ar                                   |
| $V_{ar,C}$              | Velocidade do ar na altura da cama                 |
| $V_{ar,Ext}$            | Velocidade média do ar externo na altura de 1,5 m  |
| $V_{ar,M}$              | velocidade do ar na altura de 1,5 m                |
| $VMARS$                 | Velocidade mínima do ar de resfriamento e secagem  |
| $W$                     | Watt                                               |
| $\hat{\gamma}(h)$       | Semivariância                                      |
| $ZCT$                   | Zona de conforto térmico                           |
| $Z(X_i)$ e $Z(X_i + h)$ | Pares de observações experimentais                 |
| $ZOA$                   | Zona ocupada pelos animais                         |
| $\Delta H_{Int}$        | Varição da Entalpia Específica do Ar interna       |
| $\Delta ITU_{Int}$      | Varição do Índice de Temperatura e Umidade interno |
| $\Delta t_{bs,Int}$     | Varição da temperatura de bulbo seco do ar interna |
| $\Delta UR_{Int}$       | Varição da umidade relativa do ar interna          |

## SUMÁRIO

|              |                                                                                         |    |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....                                                           | 22 |
| <b>1.1</b>   | <b>OBJETIVOS</b> .....                                                                  | 25 |
| <b>1.1.1</b> | <b>Geral</b> .....                                                                      | 25 |
| <b>1.1.2</b> | <b>Específicos</b> .....                                                                | 25 |
|              | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                                                 | 26 |
| <b>2</b>     | <b>CAPÍTULO I</b> .....                                                                 | 29 |
| <b>2.1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                                 | 30 |
| <b>2.2</b>   | <b>SURGIMENTO E IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i></b> .....                  | 32 |
| <b>2.2.1</b> | <b>Surgimento dos sistemas <i>Compost Barn</i></b> .....                                | 32 |
| <b>2.2.2</b> | <b>Implantação dos sistemas <i>Compost Barn</i> no Brasil</b> .....                     | 33 |
| <b>2.3</b>   | <b>CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i></b> .....                  | 34 |
| <b>2.3.1</b> | <b>Processos de compostagem e semi-compostagem</b> .....                                | 34 |
| <b>2.3.2</b> | <b>Fatores que influenciam a semi-compostagem em sistemas <i>Compost Barn</i></b> ..... | 36 |
| 2.3.2.1      | Temperatura.....                                                                        | 36 |
| 2.3.2.2      | Umidade .....                                                                           | 37 |
| 2.3.2.3      | Potencial hidrogeniônico .....                                                          | 39 |
| 2.3.2.4      | Concentração de nutrientes .....                                                        | 40 |
| 2.3.2.5      | Aeração.....                                                                            | 40 |
| <b>2.4</b>   | <b>CAMA EM SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i></b> .....                                       | 41 |
| <b>2.4.1</b> | <b>Materiais de cama</b> .....                                                          | 41 |
| <b>2.4.2</b> | <b>Manejo da cama</b> .....                                                             | 43 |
| 2.4.2.1      | Controle da densidade de animais alojados.....                                          | 43 |
| 2.4.2.2      | Revolvimento do material de cama.....                                                   | 44 |
| 2.4.2.3      | Adição de material seco .....                                                           | 49 |
| <b>2.5</b>   | <b>TIPOLOGIA CONSTRUTIVA DE SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i> NO BRASIL</b><br>.....         | 49 |
| <b>2.6</b>   | <b>ACONDICIONAMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i></b> .....                   | 52 |
| <b>2.6.1</b> | <b>Ventilação em sistemas <i>Compost Barn</i> com laterais abertas</b> .....            | 53 |
| <b>2.6.2</b> | <b>Ventilação em sistemas <i>Compost Barn</i> totalmente fechados</b> .....             | 58 |
| <b>2.7</b>   | <b>AMBIENTE TÉRMICO EM SISTEMAS <i>COMPOST BARN</i></b> .....                           | 60 |

|         |                                                                                             |            |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 2.7.1   | <b>Avaliação do ambiente térmico por meio de temperatura e umidade relativa do ar .....</b> | <b>60</b>  |
| 2.7.2   | <b>Avaliação do ambiente térmico por meio de índices de conforto térmico .....</b>          | <b>62</b>  |
| 2.7.3   | <b>Uso de modelagem para avaliação das condições térmico-ambientais.....</b>                | <b>64</b>  |
| 2.8     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                                            | <b>66</b>  |
|         | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                     | <b>67</b>  |
| 3       | <b>CAPÍTULO II.....</b>                                                                     | <b>79</b>  |
| 3.1     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                     | <b>81</b>  |
| 3.2     | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                             | <b>82</b>  |
| 3.2.1   | <b>Caracterização da instalação e das técnicas de manejo.....</b>                           | <b>83</b>  |
| 3.2.2   | <b>Sistema de aquisição de dados microclimáticos.....</b>                                   | <b>86</b>  |
| 3.2.3   | <b>Avaliação do conforto térmico ambiente.....</b>                                          | <b>87</b>  |
| 3.2.4   | <b>Análises estatísticas .....</b>                                                          | <b>89</b>  |
| 3.2.4.1 | <b>Análise descritiva dos dados ambientais .....</b>                                        | <b>89</b>  |
| 3.2.4.2 | <b>Análise de variabilidade e distribuição espacial dos dados ambientais .....</b>          | <b>89</b>  |
| 3.3     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                         | <b>91</b>  |
| 3.3.1   | <b>Distribuição temporal de variáveis do ambiente térmico .....</b>                         | <b>91</b>  |
| 3.3.2   | <b>Dependência e distribuição espacial de variáveis do ambiente térmico.....</b>            | <b>97</b>  |
| 3.4     | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                     | <b>111</b> |
|         | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                    | <b>111</b> |
| 4       | <b>CAPÍTULO III .....</b>                                                                   | <b>117</b> |
| 4.1     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                                     | <b>119</b> |
| 4.2     | <b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>                                                             | <b>120</b> |
| 4.2.1   | <b>Caracterização da instalação <i>Compost Barn</i> e das práticas de manejo.....</b>       | <b>121</b> |
| 4.2.2   | <b>Aquisição dos dados de velocidade do ar .....</b>                                        | <b>123</b> |
| 4.2.3   | <b>Análises estatísticas .....</b>                                                          | <b>124</b> |
| 4.2.3.1 | <b>Análises de estatística descritiva .....</b>                                             | <b>124</b> |
| 4.2.3.2 | <b>Análises de geoestatística.....</b>                                                      | <b>124</b> |
| 4.3     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                         | <b>126</b> |
| 4.4     | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                                                     | <b>135</b> |
|         | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                    | <b>136</b> |
| 5       | <b>CAPÍTULO IV .....</b>                                                                    | <b>140</b> |

|              |                                                                                                    |     |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>5.1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b> .....                                                                            | 142 |
| <b>5.2</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....                                                                    | 143 |
| <b>5.2.1</b> | <b>Caracterização da instalação <i>Compost Barn</i> e das técnicas de manejo</b> .....             | 144 |
| <b>5.2.2</b> | <b>Caracterização do microambiente térmico no interior da instalação <i>Compost Barn</i></b> ..... | 147 |
| <b>5.2.3</b> | <b>Caracterização do material de cama</b> .....                                                    | 148 |
| <b>5.2.4</b> | <b>Análises estatísticas</b> .....                                                                 | 149 |
| 5.2.4.1      | Análises de estatística descritiva .....                                                           | 149 |
| 5.2.4.2      | Análises de geoestatística .....                                                                   | 150 |
| <b>5.3</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....                                                                | 151 |
| <b>5.3.1</b> | <b>Caracterização média horária do microambiente térmico no interior da instalação</b> .....       | 151 |
| <b>5.3.2</b> | <b>Caracterização da variabilidade espacial de atributos físicos da cama</b> .....                 | 152 |
| <b>5.4</b>   | <b>CONCLUSÕES</b> .....                                                                            | 170 |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b> .....                                                                           | 171 |
| <b>6</b>     | <b>CONCLUSÕES GERAIS</b> .....                                                                     | 177 |
|              | <b>ANEXO A</b> .....                                                                               | 179 |

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Nas últimas décadas, a bovinocultura de leite tem apresentado elevado crescimento no Brasil. De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2021), a produção nacional de leite atingiu 36,752 bilhões de litros em 2020, consolidando o Brasil como o quarto maior produtor mundial, atrás apenas da Índia (194,800 bilhões de litros de leite), Estados Unidos (101,251 bilhões de litros de leite) e Paquistão (57,722 bilhões de litros de leite).

Todavia, a produtividade brasileira de leite ainda é baixa, quando comparada com a média de países da Europa e América do Norte. De fato, a criação de bovinos especializados em produção de leite, em geral provenientes de países de climas temperados, é uma atividade particularmente desafiadora para as regiões de climas tropical e subtropical, uma vez que as condições de altas temperaturas causam estresse térmico e podem influenciar negativamente e de forma direta o desempenho produtivo e reprodutivo destes animais (Pinheiro et al., 2015; Valente et al., 2020). Portanto, a adoção de adequadas tecnologias nas propriedades leiteiras é fator primordial para que se reverta esse quadro de baixa produtividade associada ao clima, possibilitando melhores rendimentos para o setor de produção de leite (De Mori et al., 2020).

O confinamento dos bovinos leiteiros em instalações constitui uma das principais estratégias utilizadas quando se busca melhorar produtividade, qualidade do leite e sanidade geral do rebanho (Perissinotto & Moura, 2007; Passetti et al., 2016). O fato é que ao se restringir a movimentação dos animais, alojando-os em uma área protegida, viabiliza-se a possibilidade de acondicionamento do ambiente no qual os mesmos estão inseridos, de modo a assegurar melhores condições térmico-ambientais, índices produtivos, reprodutivos, sanitários e de qualidade do leite, ao mesmo tempo em que facilita o manejo e gerenciamento sustentável dos resíduos gerados (Damasceno, 2020; Mee & Boyle, 2020; Andrade et al., 2021).

Em todo o mundo, o uso de sistemas de confinamento na bovinocultura leiteira tem crescido nas últimas décadas (Galama et al., 2020). Dentre os sistemas intensivos de produção de bovinos de leite utilizados no Brasil, tem-se observado crescimento do sistema conhecido como *Compost Barn (CB)* (Damasceno, 2020). Neste sistema, os animais permanecem confinados em instalações livres de baias, em uma grande área comum, com cama de material macio e confortável, disposta em forma de colchão que, sob determinadas condições de temperatura e umidade, é decomposta ao longo do tempo (Black et al., 2013; Eckelkamp et al., 2016).

Nos sistemas *CB*, a decomposição do material de cama ocorre por meio de uma semi-compostagem, processo biológico este influenciado por fatores como temperatura, umidade, potencial hidrogeniônico (pH) e concentração de nutrientes e oxigênio (O<sub>2</sub>) (Pedrosa et al., 2013; Damasceno, 2020). Logo, além de possibilitar melhorias no conforto térmico dos animais, o manejo deve assegurar condições favoráveis para que o processo de semi-compostagem ocorra de maneira satisfatória (Black et al., 2014; Leso et al., 2020). De forma simplificada, o manejo neste tipo de sistema é realizado por meio do controle da densidade de animais alojados, da promoção da ventilação, do revolvimento da cama e da adição de material orgânico seco.

Primariamente, a densidade de bovinos leiteiros alojados é definida na fase projetual, considerando aspectos como clima, porte, produtividade etc., de modo a assegurar livre movimentação e acesso aos comedouros e bebedouros pelos animais, bem como garantir que o material de cama permaneça seco (Damasceno, 2020; Leso et al., 2020). Uma vez que a quantidade de animais alojados está associada de forma direta com compactação da cama, deposição de dejetos, condições ambientais e taxa de ventilação fornecida, segundo os supracitados autores, este parâmetro deve ser avaliado mesmo após a instalação construída, para que sejam realizadas as adequações de manejo necessárias.

O sistema de ventilação deve assegurar que a velocidade do ar seja mantida próxima de 1,80 m·s<sup>-1</sup> em toda a área da instalação, possibilitando secar a cama, remover gases e favorecer as trocas térmicas (Black et al., 2013). No Brasil, a maioria dos sistemas *CB* construídos possuem laterais abertas, fazendo uso da ventilação natural e, se necessário, com uso de sistemas mecânicos de ventilação (Pilatti & Vieira, 2017; Damasceno, 2020). Recorrentemente, a ventilação natural sozinha não assegura condições adequadas para os animais alojados e para a correta semi-compostagem da cama. Por esta razão, frequentemente são empregados sistemas de ventilação mecânica por pressão positiva, com uso de ventiladores de baixo volume e alta rotação (*LVHS*), ou ventiladores de alto volume e baixa rotação (*HVLS*) (Leso et al., 2018; Caldato et al., 2020).

Segundo Barberg et al. (2007) e Black et al. (2013), a operação de revolvimento da cama deve ser realizada constantemente, de duas a três vezes ao dia, para incorporar os dejetos acumulados na superfície, assegurar a quebra de estruturas compactadas, fornecer oxigênio aos microrganismos decompositores aeróbios e, conseqüentemente, potencializar a atividade de decomposição da cama. Recomenda-se que o revolvimento seja realizado na profundidade de 0,18 a 0,30 m, porém a espessura da camada revolvida é função do tipo de implemento utilizado,

que deve ser escolhido considerando o aspecto físico da cama (Janni et al., 2007; Damasceno, 2020).

Por fim, quando o material de cama está excessivamente úmido ou a relação carbono nitrogênio (C/N) está baixa, é realizada a operação de reposição da cama, adicionando-se material orgânico seco (Damasceno, 2020). Esta prática de manejo é realizada com maior frequência durante o inverno, período em que as condições de temperatura e umidade do ar dificultam a secagem da cama (Andrade et al., 2021).

Em qualquer sistema de produção animal, a realização de estudos de caracterização das instalações de alojamento, do ambiente de produção e das práticas de manejo é de elevada importância, pois possibilita levantar informações detalhadas acerca dos pontos a serem ajustados pelos produtores (Faria et al., 2008). Contudo, o que se verifica é que, ainda há enorme carência de informações detalhadas relativas aos sistemas *CB* construídos no Brasil e sua aplicabilidade, eficiência e funcionalidade às condições do país, tais como tipologia construtiva, tecnologias empregadas, materiais e manejos aplicados à cama etc. Por esta razão, torna-se muito importante a realização de amplos estudos quanto a caracterização de sistemas *CB*, identificando-se os principais pontos a serem elucidados via investigação científica.

Ao mesmo tempo, é importante que sejam realizados processos de avaliação do ambiente e da cama, que podem ser utilizados como base para adequações de manejo, tido como o ponto-chave para o sucesso do sistema *CB* (Black et al., 2013; Pilatti & Vieira, 2017; Leso et al., 2020). Assim, em relação a qualidade da cama, variáveis como temperatura ( $t_c$ ), umidade ( $U_c$ ), potencial hidrogeniônico ( $pH_c$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ) devem ser avaliadas frequentemente. Tais parâmetros podem ser utilizados como indicadores de conforto térmico na superfície, e de desenvolvimento do processo de semi-compostagem na camada aerobiamente ativa (0,15 – 0,30 m) (Black et al., 2013; Pedrosa et al., 2013). Simultaneamente, é imprescindível que a avaliação do ambiente de produção seja feita à luz das variáveis térmico-ambientais com influência direta sobre os animais (temperatura de bulbo seco do ar –  $t_{bs}$ , umidade relativa do ar – UR, e velocidade do ar –  $v_{ar}$ ) e de Índices de Conforto Térmico (ICTs), que consideram o efeito combinado de mais de uma destas variáveis (Perissinotto et al., 2009; Baêta & Souza, 2010). (Black et al., 2013; Pedrosa et al., 2013)

Diante do exposto, torna-se evidente que conhecer a variabilidade espacial de atributos dos ambientes térmico e da cama em sistemas *CB*, ao longo de toda a zona ocupada pelos animais (ZOA), é muito importante. As informações levantadas por meio dos estudos de avaliação destes sistemas podem facilitar a identificação de zonas críticas em relação ao manejo, viabilizando maior assertividade na tomada de decisão e na gestão do manejo, com

vistas à melhoria dos índices produtivos, reprodutivos, de bem-estar animal e sanitários, bem como da sustentabilidade econômica e ambiental do empreendimento.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Geral**

Avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial de variáveis térmico-ambientais e da cama em relação a área interna de uma instalação para confinamento de bovinos de leite em produção, em sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva, durante o período de inverno.

### **1.1.2 Específicos**

- I. Realizar um levantamento dos principais aspectos que norteiam o uso de sistemas *Compost Barn (CB)* no Brasil, abordando seu surgimento, conceito de funcionamento, tipologia construtiva, materiais e manejos aplicados a cama, acondicionamento térmico e avaliação do ambiente neste modelo de instalação, para as especificidades climáticas do país;
- II. Caracterizar dependência e distribuição espacial e temporal de variáveis e índices do ambiente térmico no interior de um sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva (*CBAVP*), durante o período de inverno;
- III. Avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial das variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m e velocidade do ar ao nível da cama na área interna de uma instalação para confinamento de bovinos leiteiros em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*);
- IV. Avaliar se as variáveis temperatura, umidade e pH da cama, bem como velocidade do ar ao nível da cama, possuem dependência e variabilidade espacial em relação a área interna de uma instalação de confinamento de bovinos de leite em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*), durante o período de inverno.

Para reportar os resultados alcançados por meio da realização do presente estudo, conforme os objetivos delineados, esta dissertação foi dividida em quatro capítulos, assim intitulados:

- Capítulo I. Confinamento de bovinos leiteiros em sistemas *Compost Barn* no Brasil: histórico, características e considerações
- Capítulo II. Distribuição espacial e temporal do microambiente térmico em sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva
- Capítulo III. Variabilidade espacial da velocidade do ar no interior de sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva
- Capítulo IV. Variabilidade espacial de atributos físicos da cama em instalação *Compost Barn* aberta com ventilação por pressão positiva em condições de inverno

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; FREITAS, L.C.S.R.; FERREIRA, C.F.S.; BARBARI, M.; BAPTISTA, F.J.F.; COELHO, D.J.R. Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, v.23, p.103111, 2021. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103111.
- BAÊTA, F.C.; SOUZA, C.F. **Ambiência em edificações rurais: Conforto térmico**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 269p.
- BARBERG, A.E.; ENDRES, M.I.; JANNI, K.A. Compost dairy barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.231–238, 2007.
- BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; BEWLEY, J.M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v.96, p.8060–8074, 2013. DOI: 10.3168/jds.2013-6778.
- BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; NEWMAN, M.C.; AKERS, K.A.; WOOD, C.L.; MCQUERRY, K.J.; BEWLEY, J.M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, v.97, p.2669–2679, 2014. DOI: 10.3168/JDS.2013-6779.
- CALDATO, E.M.R.; CALDATO, A.; MARCONDES, M.I.; ROTTA, P.P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35p.
- DAMASCENO, F.A. **Compost Barn como uma alternativa para a pecuária leiteira**. 1.ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396p.
- ECKELKAMP, E.A.; TARABA, J.L.; AKERS, K.A.; HARMON, R.J.; BEWLEY, J.M. Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, v.190, p.35–42, 2016. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.05.017.
- FARIA, F.F.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MATARAZZO, S.V. Variabilidade espacial do microclima de um galpão utilizado para confinamento de bovinos de leite. **Ciência Rural**, v.38, p.2498–2505, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000900013.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **Overview of global dairy market developments in 2020**. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/cb4230en/cb4230en.pdf>>. Acesso em: 2 nov. 2021.

GALAMA, P.J.; OUWELTJES, W.; ENDRES, M.I.; SPRECHER, J.R.; LESO, L.; KUIPERS, A.; KLOPČIČ, M. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.5759–5772, 2020. DOI: 10.3168/JDS.2019-17214.

JANNI, K.A.; ENDRES, M.I.; RENEAU, J.K.; SCHOPER, W.W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.97–102, 2007. DOI: 10.13031/2013.22333.

LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M.A.; DAMASCENO, F.A.; GALAMA, P.; TARABA, J.L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LESO, L.; CONTI, L.; ROSSI, G.; BARBARI, M. Criteria of design for deconstruction applied to dairy cows housing: A case study in Italy. **Agronomy Research**, v.16, p.794–805, 2018. DOI: 10.15159/AR.18.085.

MEE, J.; BOYLE, L. Assessing whether dairy cow welfare is “better” in pasture-based than in confinement-based management systems. **New Zealand Veterinary Journal**, v.68, p.168–177, 2020. DOI: 10.1080/00480169.2020.1721034.

MORI, C. DE; CAMARGO, A.C.; NOVO, A.L.M.; PALHARES, J.C.P.; BERGAMASCHI, M.A.C.M.; BARIONI JUNIOR, W.; VINHOLIS, M.M.B. **Índice de atualização tecnológica para propriedades leiteiras: IAT-Leite**. 1.ed. São Carlos: EMBRAPA Pecuária Sudeste, 2020. 18p.

PASSETTI, R.A.C.; EIRAS, C.E.; GOMES, L.C.; SANTOS, J.F.; PRADO, I.N. Intensive dairy farming systems from Holland and Brazil: SWOT analyse comparison. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.38, p.439–446, 2016. DOI: 10.4025/actascianimsci.v38i4.31467.

PEDROSA, T.D.; FARIAS, C.A.S.; PEREIRA, R.A.; FARIAS, E.T.R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v.1, p.44–48, 2013. DOI: 10.14583/2318-7670.v01n01a08.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.1, p.117–126, 2007. DOI: 10.18011/bioeng2007v1n2p117-126.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J.; CRUZ, V.F.; SOUZA, S.R.L.; LIMA, K.A.O.; MENDES, A.S. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciência Rural**, v.39, p.1492–1498, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000094.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.5, p.97–105, 2017.

PINHEIRO, A.C.; SARAIVA, E.P.; SARAIVA, C.A.S.; FONSECA, V. DE F.C.; ALMEIDA, M.E.V.; SANTOS, S.G.G.C.; AMORIM, M.L.C.M.; RODRIGUES NETO, P.J. Características

anatomofisiológicas de adaptação de bovinos leiteiros ao ambiente tropical. **Agropecuária Técnica**, v.36, p.280–293, 2015. DOI: 10.25066/agrotec.v36i1.22280.

VALENTE, D.A.; SOUZA, C.F.; ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; SOUSA, F.C.; ROSSI, G. Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, v.18, p.1547–1555, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.103.

## 2 CAPÍTULO I

### **CONFINAMENTO DE BOVINOS LEITEIROS EM SISTEMAS *COMPOST BARN*S NO BRASIL: HISTÓRICO, CARACTERÍSTICAS E CONSIDERAÇÕES**

**RESUMO:** O confinamento de bovinos leiteiros em instalações tornou-se prática comum no mundo, sendo atualmente uma das principais estratégias utilizadas quando se deseja minimizar impactos ambientais, otimizar o manejo dos resíduos gerados pela atividade, bem como controlar condições do ambiente de criação, assegurando que os animais expressem seu máximo potencial produtivo. Neste sentido, muito embora já praticada há mais de 20 anos em países de climas temperados, verificou-se que na última década o sistema de confinamento conhecido como *Compost Barn (CB)* passou a receber elevada aderência pelos produtores de leite brasileiros, que buscam controlar as condições ambientais e, por conseguinte, alcançar melhorias de produtividade, qualidade do leite e sanidade do rebanho. A implantação de um sistema *CB* deve considerar as especificidades do clima local, pois caso sejam projetados, construídos e manejados de forma inadequada, podem provocar efeitos contrários ou aquém ao que se deseja. No Brasil, apesar da elevação do número de sistemas *CB* construídos, há grande carência de informações e orientações detalhadas, relativas à aplicabilidade, funcionalidade e adequação de manejos às condições e tipologias construtivas e situação climática do país. Ante o exposto, busca-se com este trabalho realizar um diagnóstico dos principais aspectos que norteiam o uso de sistemas *CB* no Brasil, abordando seu surgimento, conceito, tipologia construtiva, materiais e manejos aplicados a cama, acondicionamento térmico e avaliação do ambiente neste tipo de instalação para as especificações climáticas do país, objetivando identificar os principais pontos a serem elucidados via investigação científica para seu emprego.

**Palavras-chave:** produção de leite, sistemas de confinamento, compostagem, conforto térmico, acondicionamento térmico, ventilação

### **DAIRY CATTLE CONFINEMENT IN COMPOST BARN SYSTEMS IN BRAZIL: HISTORIC, CHARACTERISTICS AND CONSIDERATIONS**

**ABSTRACT:** The dairy cattle confinement in facilities has become a common practice in the world, being currently one of the main strategies used when it is desired to minimize environmental impacts, optimize the management of waste generated by the activity, as well as control conditions of the breeding environment, ensuring that the animals to express their maximum productive potential. In this sense, although it has been practiced for more than 20

years in countries with temperate climates, it was found that in the last decade the confinement system known as Compost Barn (CB) started to receive high adherence by Brazilian milk producers, who seek to control environmental conditions and, therefore, achieve improvements in productivity, milk quality and herd health. The implementation of a CB system must consider the specifics of the local climate, because if they are improperly designed, built, and managed, they can cause opposite effects or less than what is desired. In Brazil, despite the increase in the number of CB systems built, there is a great lack of information and detailed guidelines regarding the applicability, functionality, and adequacy of managements to the conditions and constructive typologies and climatic situation of the country. In view of the above, this work seeks to carry out a diagnosis of the main aspects regarding the use of CB systems in Brazil, addressing its emergence, concept, constructive typology, materials, and management applied to bedding, thermal conditioning, and environmental assessment in this type. of installation for the climatic specifications of the country, aiming to identify the main points to be elucidated through scientific investigation for its use.

**Keywords:** milk production, confinement systems, composting, thermal comfort, thermal conditioning, ventilation

## 2.1 INTRODUÇÃO

A criação de bovinos especializados em produção de leite, geralmente oriundos de países de climas temperados, constitui atividade particularmente desafiadora para as regiões de climas tropical e subtropical, como é o caso do Brasil, uma vez que as condições de estresse devido as altas temperaturas influenciam diretamente o desempenho produtivo e reprodutivo destes animais (Pinheiro et al., 2015; Valente et al., 2020). Por este motivo, o confinamento de bovinos leiteiros em instalações constitui uma das principais estratégias utilizadas quando se busca melhorar produtividade, qualidade do leite e sanidade do rebanho (Perissinotto et al., 2009). O uso de sistemas de confinamento em galpões de contenção apresenta como principais vantagens possibilitar melhor controle das condições ambientais, assegurando que os animais expressem seu máximo potencial produtivo, e facilitar o manejo e sustentabilidade ambiental dos resíduos gerados pela atividade (Passetti et al., 2016; Mee & Boyle, 2020).

Os sistemas intensivos de produção aplicados a pecuária leiteira, na qual se usam galpões para alojamento, tem sido classificados de forma prática como: *Tie Stall (TS)* – em que as vacas recebem alimentação em comedouros individuais, estando contidas pelo pescoço; *Free Stall (FS)* – no qual as vacas ficam livres para circulação entre uma área coberta, onde são

disponibilizados camas individuais e comedouros, uma área externa restrita para solário e bebedouros, e uma área de circulação, onde podem depositar fezes e urina, que são removidas para lagoas ou tanques com uso de carreamento hídrico; *Loose Housing (LH)* – em que as vacas ficam livres em instalações cobertas, sobre substrato contínuo, no estilo baias coletivas, com fornecimento de alimentação em área separada coberta; e *Compost Barn (CB)* – no qual as vacas ficam confinadas em instalações únicas, com movimentação livre sobre cama contínua, com alimentação e água fornecidas internamente, em área distinta da cama (Damasceno, 2020; Souza et al., 2021).

Nos últimos anos, tem se observado tendência à utilização de sistemas de confinamento em instalações livres, que possibilitam melhorias nas condições de conforto térmico, com predominância de sistemas *FS* em todo o mundo (Leso et al., 2020). No Brasil, em específico, apesar da predominância do sistema *FS*, o uso do sistema de confinamento *CB* apresentou elevado crescimento na última década (Damasceno, 2020). Com a sua adoção, busca-se assegurar maior liberdade de movimentação e interação entre os animais, reduzir volume e facilitar o manejo dos resíduos, economizar água, formar um composto com aplicação agrônômica e, conseqüentemente, assegurar menor custo de alojamento dos animais, quando comparado ao sistema *FS* (Damasceno, 2020; Galama et al., 2020; Souza et al., 2021).

No sistema *CB*, os animais permanecem confinados em instalações livres, em uma grande área comum, com cama de material macio e confortável disposta em forma de colchão que, sob determinadas condições de temperatura e umidade, sofrerá o processo de compostagem ao longo do tempo (Black et al., 2013; Eckelkamp et al., 2016). Na literatura, reporta-se que as principais vantagens do seu uso são melhorias no conforto e bem-estar dos animais, aumento na produtividade, sanidade e longevidade do rebanho, redução nos custos de produção e melhor destinação dos dejetos produzidos (Black et al., 2013; Bewley et al., 2017; Leso et al., 2019).

Os primeiros sistemas *CB* construídos no Brasil foram projetados de acordo com o modelo norte-americano, idealizado para condições de climas temperados (Leso et al., 2020). Todavia, dadas as condições de climas tropical e subtropical presentes ao longo do território brasileiro, optou-se pela utilização de instalações com laterais abertas. Neste caso, inicialmente explora-se a ventilação natural, ou, em locais onde o fornecimento natural de ar não é satisfatório, empregam-se sistemas mecânicos de ventilação (Pilatti & Vieira, 2017; Leso et al., 2018), que podem ser utilizados associados ou não ao resfriamento adiabático evaporativo (nebulização).

É importante destacar que a implantação de um sistema *CB* deve considerar as particularidades do clima local, pois caso sejam projetados, construídos e manejados de maneira

inadequada, podem provocar efeitos contrários ou aquém ao que se deseja (Leso et al., 2013). Apesar disso, há carência de informações detalhadas sobre os sistemas *CB* construídos no Brasil, tais como tipologia construtiva, tecnologias empregadas, materiais e manejos aplicados à cama etc. Ante o exposto, busca-se com este trabalho realizar um levantamento dos principais aspectos que norteiam o uso de sistemas *CB* no Brasil, abordando seu surgimento, conceito de funcionamento, tipologia construtiva, materiais e manejos aplicados a cama, acondicionamento térmico e avaliação do ambiente neste modelo de instalação para as especificidades climáticas do país, objetivando identificar os principais pontos a serem elucidados, via investigação científica, para o seu emprego.

## **2.2 SURGIMENTO E IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS *COMPOST BARN***

### **2.2.1 Surgimento dos sistemas *Compost Barn***

Os sistemas *CB* foram desenvolvidos como uma alternativa ao *Free Stall (FS)* e *Tie Stall (TS)*, modelos tradicionais de confinamento utilizados na pecuária leiteira (Leso et al., 2020). Na literatura, relata-se que a primeira instalação *CB* foi construída no estado americano da Virgínia, ainda na década de 1980 (Wagner, 2002). Todavia, a utilização deste modelo de confinamento consolidou-se apenas a partir de 2001, quando empresários atuantes no setor de laticínios implantaram as primeiras instalações do tipo *CB* no estado de Minnesota, também nos Estados Unidos da América (Barberg et al., 2007b; Leso et al., 2020).

De acordo com Damasceno (2020), na primavera de 2001, os irmãos Tom e Mark Portner leram uma matéria sobre um novo tipo de instalação para produção leiteira em uma revista agrícola de Minnesota (*Minnesota Farm Journal*). A matéria descrevia um sistema de produção diferente daqueles já utilizados na região, que se baseava em uma instalação aberta, sem baias individuais e com piso de terra batida, ao qual era adicionada serragem, formando uma espécie de cama onde os animais poderiam deitar-se e descansar (Janni et al., 2007). Ao lerem a matéria, os irmãos Portner ficaram muito interessados pelo conceito deste novo sistema e decidiram construir uma instalação em sua propriedade com base neste conceito, a qual foi finalizada em outubro de 2001.

A partir de então, muitos sistemas *CB* foram construídos nos Estados Unidos da América, e o conceito de compostagem do material de cama foi sendo aprimorado. Os produtores passaram a adicionar serragem e/ou maravalha de madeira e realizar o revolvimento da cama duas ou três vezes ao dia, possibilitando que ocorresse a degradação aeróbia do material de cama (Janni et al., 2007).

Baseado no modelo norte-americano, mas adaptado às áridas condições climáticas locais, em 2006 foi desenvolvido em Israel uma variação do sistema *CB*, com cama formada apenas pelas fezes e urina dos animais, sem adição de material orgânico (Klaas et al., 2010). As principais características que diferenciam o sistema *CB* israelense do norte-americano são maior área de cama por animal, ausência de adição de material orgânico e menores níveis de calor na cama (Damasceno, 2020). Neste sistema, o revolvimento da cama é realizado uma ou duas vezes ao dia, sendo que as condições climáticas locais e a maior área de cama por animal são os fatores que garantem a manutenção do material seco (Balcells et al., 2020).

Mesmo com diferenças, os sistemas *CB* norte-americano e israelense forneceram a base para a implantação de variações dos mesmos pelo mundo (Galama et al., 2020). Nas duas últimas décadas, eles se espalharam mundialmente, havendo relatos da sua utilização na Argentina (Lazzarini et al., 2019), Áustria (Ofner-Schröck et al., 2015; Burgstaller et al., 2016), Brasil (Fávero et al., 2015; Damasceno et al., 2019; Kappes et al., 2020; Radavelli et al., 2020; Andrade et al., 2021), Coréia do Sul (Kim et al., 2018), Espanha (Balcells et al., 2020), Estados Unidos (Barberg et al., 2007b; Janni et al., 2007; Lobeck et al., 2011; Black et al., 2013), Holanda (Galama et al., 2020), Israel (Klaas et al., 2010), Itália (Leso et al., 2018; Biasato et al., 2019; Lovarelli et al., 2020), Japão (Saishu et al., 2015), Ucrânia (Borshch et al., 2017) etc.

### **2.2.2 Implantação dos sistemas *Compost Barn* no Brasil**

Segundo Silano & Santos (2012), o primeiro sistema *CB* implantado no Brasil foi construído no ano de 2012, na Fazenda Santa Andrea, em Itararé – SP. Conforme os autores, a fazenda decidiu pelo sistema *CB* em virtude de seu menor custo de implantação, rapidez de construção e melhoria no conforto animal, quando comparado ao *FS*, modelo de confinamento consolidado no país. Porém, existem controvérsias em relação a primeira instalação ter sido a da Fazenda Santa Andrea, já que produtores da região de Piracicaba – SP afirmam que o primeiro sistema *CB* foi construído naquela região, no mesmo ano (Mota et al., 2017).

Os sistemas *CB* implantados em Itararé e Piracicaba basearam-se no modelo norte-americano, sendo construídas instalações com laterais abertas, com uso da ventilação natural e suplementação via ventilação mecânica (Mota et al., 2017). A partir de então, muitos sistemas *CB* foram e estão sendo construídos pelo país, possuindo características e tecnologias variáveis, conforme as condições locais.

De modo semelhante ao que foi observado em outros países, a quantidade de sistemas *CB* cresce rapidamente no Brasil. No estado de Minas Gerais, principal produtor de leite do país, atualmente não se sabe o número exato de sistemas *CB* construídos (Damasceno, 2020).

Além de Minas Gerais (Mota et al., 2019b; Valente et al., 2020; Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021) e São Paulo (Silano & Santos, 2012; Mota et al., 2017), já se tem registros de instalações construídas nos estados do Ceará (Peixoto et al., 2019), Goiás (Motta et al., 2019), Paraná (Pilatti et al., 2019), Pernambuco (Silva et al., 2020), Rio Grande do Sul (Weber et al., 2020), Santa Catarina (Radavelli et al., 2020), entre outros.

### **2.3 CONCEITO DE FUNCIONAMENTO DE SISTEMAS *COMPOST BARN***

O conceito de funcionamento do sistema *CB*, que o diferencia dos demais sistemas de confinamento de bovinos em instalações com cama, é a introdução de métodos de compostagem dos resíduos gerados pelos animais, juntamente com o material da cama (Black et al., 2013). De modo geral, a compostagem é definida como um processo biológico de decomposição e estabilização da matéria orgânica, em que ocorre degradação dos compostos constituintes dos materiais e há liberação de água e dióxido de carbono (Pereira Neto, 2007). Portanto, pode-se dizer que se trata de um processo de transformação dos resíduos orgânicos biodegradáveis em compostos com características desejáveis, tais como potencial de uso agrícola, facilidade de manuseio e ausência de microrganismos patogênicos (Cotta et al., 2015).

#### **2.3.1 Processos de compostagem e semi-compostagem**

O processo de compostagem é realizado por milhões de microrganismos, presentes nos próprios resíduos ou adicionados via inoculação. Estes microrganismos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia, nutrientes e carbono, e promovem a mineralização e umidificação de partes do material (Budziak et al., 2004). Durante o referido processo, as populações e comunidades de microrganismos mudam de maneira contínua, conforme as condições ambientais, disponibilidade de nutrientes e oxigênio, umidade e potencial hidrogeniônico (pH) do material (Valente et al., 2009).

Nos sistemas *CB*, os processos de compostagem da cama se diferenciam daqueles que ocorrem em leiras revolvidas (compostagem comum), devido as condições ambientais e diferenças de manejo, que fazem que o processo de decomposição da cama tenha características próprias. As principais diferenças referem-se as variações de umidade, aeração e compactação do material de cama, incrementos periódicos de nutrientes via dejetos animais e maior área superficial para perda de calor (Damasceno, 2020).

No processo de compostagem comum, o material com interesse de degradação, geralmente esterco de aves e/ou suínos, é depositado sobre o solo compactado, intercalado com

camadas de restos vegetais (proporção 1:3), umedecido e aerado em intervalos regulares, variáveis entre estágios. Nos primeiros quinze dias, o material é revolvido a cada cinco dias e, após este período, a cada dez dias. No decorrer deste processo, podem ser observados quatro estágios distintos, designados, com base na temperatura do material, como psicrófilo, mesófilo, termófilo e de maturação, sendo que os principais são os estágios mesófilo e termófilo (Figura 2.1) (Oliveira et al., 2008).

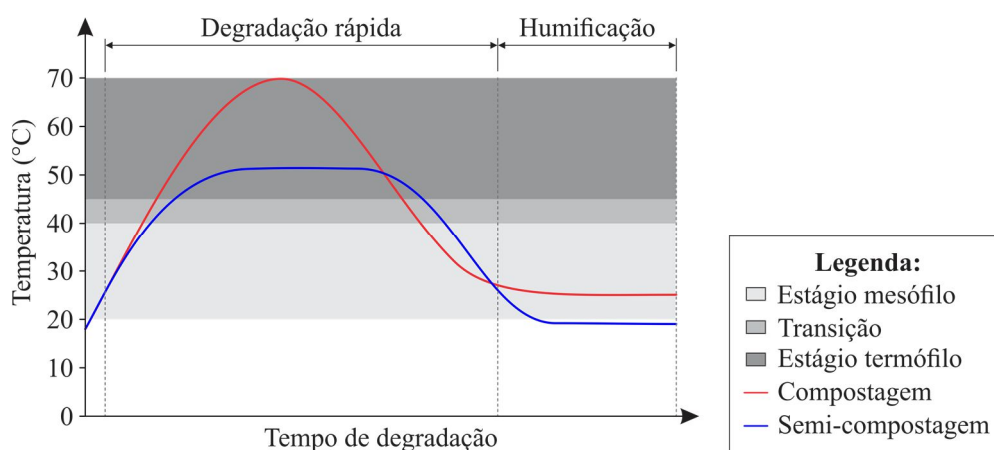


Figura 2.1. Evolução da temperatura em processos de compostagem e semi-compostagem (processo que ocorre em sistemas *Compost Barn*). Fonte: Adaptado de Damasceno (2020).

No estágio psicrófilo, os compostos solúveis degradáveis são consumidos pelos microrganismos exotérmicos e, em decorrência disso, ocorre aumento da temperatura no interior das leiras (Pereira Neto, 2007). No estágio mesófilo, ocorre a transformação da matéria orgânica em ácidos e, por consequência, há redução do pH do material, ao passo que a temperatura no interior da leira continua aumentando até atingir níveis letais para microrganismos mesofílicos e propícios para o desenvolvimento de microrganismos termofílicos (Hassen et al., 2001). O estágio termófilo começa com o desenvolvimento dos microrganismos termofílicos, e é caracterizada pela degradação dos compostos mais complexos e eliminação de patógenos não esporulados. Por fim, ocorre o estágio de maturação ou resfriamento, caracterizado pelo esgotamento da matéria orgânica, redução da temperatura, decréscimo da taxa de decomposição e formação de material húmico com odor agradável (Hassen et al., 2001; Damasceno, 2020).

Em sistemas *CB*, o material de cama, as fezes e a urina dos animais fornecem os elementos essenciais (carbono, nitrogênio, umidade e microrganismos) para que ocorra o processo de compostagem (Bewley et al., 2012; Damasceno, 2020). Todavia, não ocorre um processo de compostagem completo, haja vista que os incrementos contínuos de matéria

orgânica (fezes, urina e material de cama adicionado via reposição) não possibilitam que o material de cama atinja o estágio de maturação ou resfriamento (Damasceno, 2020). Neste caso, a cama permanece a maior parte do tempo no estágio termófilo, e pode-se dizer que o processo que ocorre é uma semi-compostagem. Neste caso, após retirado da instalação, o material de cama deve ser armazenado em local protegido de chuva e sol, e deixado coberto com lona plástica, para que o processo de decomposição seja finalizado, formando húmus (Damasceno, 2020).

### **2.3.2 Fatores que influenciam a semi-compostagem em sistemas *Compost Barn***

A semi-compostagem da cama em sistemas *CB* é um processo biológico e, por este motivo, é influenciada por fatores como temperatura, umidade, potencial hidrogeniônico (pH), concentração de nutrientes e aeração do material de cama. O controle destes fatores dentro de faixas adequadas possibilita a inibição de patógenos, o aumento do processo de degradação da matéria orgânica e garante a qualidade do composto gerado (Pedrosa et al., 2013).

#### **2.3.2.1 Temperatura**

Em processos de compostagem e/ou semi-compostagem, a temperatura é um dos principais parâmetros utilizados para avaliação da eficiência, pois está diretamente ligada com a atividade de microrganismos decompositores (Valente et al., 2009). Por outro lado, como esta variável é diretamente afetada pelos demais fatores (umidade, concentração de nutrientes e aeração do material de cama), o manejo integrado da cama deve garantir equilíbrio entre estes, de tal modo que o processo de compostagem/semi-compostagem ocorra de maneira satisfatória (Damasceno, 2020).

O processo de compostagem é função da atividade de microrganismos decompositores e, quanto mais intensa for esta atividade, maior será a produção de calor. Em sistemas *CB*, a faixa de temperatura desejada na camada aerobiamente ativa (0,15 a 0,30 m) situa-se entre 43,0 e 65,0 °C, sendo que abaixo de 40 °C a degradação do material é muito lenta, e acima de 55 °C ocorre a remoção de microrganismos patogênicos (Black et al., 2013; Damasceno, 2020).

Na literatura, os níveis médios de temperatura da cama relatados para a camada aerobiamente ativa são tão variáveis quanto a localização dos sistemas *CB* estudados, indicando que o monitoramento deste parâmetro deve ser feito para cada novo sistema construído. No Brasil, pesquisadores realizaram estudos com o objetivo de mensurar e caracterizar as

condições da cama em sistemas *CB*, e os resultados alcançados nestas pesquisas estão listados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Condições médias de temperatura e umidade da cama na camada aerobiamente ativa em sistemas *Compost Barn* retratadas por pesquisadores em estudos conduzidos no Brasil.

| Publicação<br>(Autores/ano) | Estudo        |                   |                                                                     |                     |                                                    |                                                    |
|-----------------------------|---------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
|                             | Ano           | Local             | M <sub>c</sub>                                                      | P <sub>AC</sub> (m) | t <sub>c</sub> (°C)                                | U <sub>c</sub> (%)                                 |
| Fávero et al.<br>(2015)     | 2013/<br>2014 | São<br>Paulo      | S <sub>M</sub> , M <sub>M</sub> ,<br>C <sub>Am</sub>                | 0,20                | 53,9 ± 2,7                                         | 37,4 ± 4,0                                         |
| Radavelli et al.<br>(2020)  | 2017          | Santa<br>Catarina | S <sub>M</sub> , M <sub>M</sub> ,<br>S <sub>M</sub> +M <sub>M</sub> | 0,20                | 42,5 ± 6,6                                         | 48,4 ± 10,1                                        |
| Oliveira et al.<br>(2019a)  | 2017          | Minas<br>Gerais   | S <sub>M</sub>                                                      | 0,20                | 42,8                                               | 33,1                                               |
| Oliveira et al.<br>(2019b)  | 2017/<br>2018 | Minas<br>Gerais   | S <sub>M</sub> , M <sub>M</sub> ,<br>C <sub>C</sub>                 | 0,20                | 35,9 ± 3,9                                         | 36,3 ± 5,3                                         |
| Andrade et al.<br>(2021)    | 2018/<br>2019 | Minas<br>Gerais   | M <sub>M</sub> + C <sub>C</sub>                                     | 0,20                | <sup>1</sup> 40,5 ± 3,3<br><sup>2</sup> 34,2 ± 4,3 | <sup>1</sup> 54,0 ± 2,8<br><sup>2</sup> 61,2 ± 1,8 |
| Guesine<br>(2020)           | 2019          | Minas<br>Gerais   | C <sub>A</sub>                                                      | 0,20                | 30,2                                               | 53,75                                              |

<sup>1</sup>Período de verão; <sup>2</sup>Período de inverno; M<sub>c</sub> – material de cama; P<sub>AC</sub> – profundidade em que foi realizada a análise da cama; t<sub>c</sub> – temperatura da cama; U<sub>c</sub> – umidade da cama; S<sub>M</sub> – serragem de madeira; M<sub>M</sub> – maravalha de madeira; C<sub>Am</sub> – casca de amendoim; C<sub>A</sub> – casca de arroz; C<sub>C</sub> – casca de café.

Por meio dos resultados listados na Tabela 2.1, pode-se observar que, em grande parte dos casos, a temperatura da cama na camada aerobiamente ativa esteve abaixo dos padrões recomendados para que o processo de compostagem ocorresse de maneira satisfatória (43,0 a 65,0 °C). Considerando o desvio padrão dos dados retratados pelos autores, apenas nos estudos realizados por Fávero et al. (2015), Radavelli et al. (2020) e Andrade et al. (2021) foram observados valores de temperatura superiores a 43 °C. Nos demais casos, os níveis de temperatura atingidos foram mais baixos, estimando-se que a atividade de microrganismos decompositores foi reduzida e que a degradação do material de cama nestes locais ocorreu de maneira mais lenta (Damasceno, 2020).

### 2.3.2.2 Umidade

A manutenção da umidade da cama em níveis tais que a atividade metabólica dos microrganismos decompositores não seja comprometida é fundamental para que o processo de compostagem ocorra satisfatoriamente. Deste modo, recomenda-se que os níveis de umidade

na cama sejam mantidos na faixa de 40,0 a 60,0%, assegurando a manutenção de condições aeróbias e a sobrevivência dos microrganismos decompositores (Black et al., 2013). Como a utilização do sistema objetiva fornecer uma superfície confortável e higiênica para os animais, a manutenção da umidade da cama em níveis adequados também é importante do ponto de vista de sanidade e qualidade do leite (Leso et al., 2020).

Quando o material de cama está excessivamente úmido ( $> 60,0\%$ ), parte dos espaços intrapartículas disponíveis para circulação de oxigênio ( $O_2$ ) são preenchidos com água e, conseqüentemente, há redução da concentração de oxigênio, acarretando condição de anaerobiose (Damasceno, 2020). Deste modo, o excesso de umidade na cama reduz a atividade dos microrganismos decompositores, ao mesmo tempo que pode acarretar lixiviação de nutrientes e aumento do risco de mastite clínica (Valente et al., 2009; Fávero et al., 2015). A condição contrária, ou seja, de cama com baixos níveis de umidade ( $< 40,0\%$ ), também inibe a atividade dos microrganismos decompositores, haja vista que neste caso pode ocorrer desidratação e redução de suas populações (Stentiford, 1996; Damasceno, 2020).

De acordo com Eckelkamp et al. (2016), a umidade da cama tende a aumentar nos meses mais frios do ano, em decorrência das temperaturas mais baixas registradas e da conseqüente redução da capacidade de secagem do material. O excesso de umidade na cama e as baixas temperaturas comuns em períodos frios tem como conseqüência a redução da atividade metabólica dos microrganismos decompositores, que interfere diretamente na eficiência do processo de degradação da cama (Cotta et al., 2015).

Conforme Damasceno (2020), a umidade da cama pode ser controlada e/ou corrigida durante o manejo do sistema, por meio da reposição constante de material seco, do revolvimento frequente da cama, do controle da densidade de animais alojados e do fornecimento de taxas adequadas de ventilação. Para identificação da necessidade de alterações no manejo, recomenda-se que a umidade da cama (camada de 0,1 a 0,2 m) seja monitorada semanalmente (Shane et al., 2010).

Dada a importância da umidade da cama para o desempenho dos sistemas *CB*, a nível mundial diversos trabalhos têm sido realizados, com o objetivo de mensurar e avaliar a umidade na cama. Diversos pesquisadores conduziram estudos com este objetivo no Brasil, e os resultados retratados pelos menos estão listados na Tabela 2.1.

Por meio da Tabela 2.1, pode-se observar que a umidade da cama se encontrava dentro da faixa preconizada como adequada na maioria dos estudos citados. Apenas no estudo conduzido por Andrade et al. (2021) foram reportados valores médios de umidade da cama considerados fora da faixa ideal. Todavia, os autores evidenciaram que tal condição foi

observada apenas durante o inverno (umidade média de  $61,2 \pm 1,8\%$ ), período em que há redução da taxa de secagem da cama, consequência direta das baixas temperaturas registradas.

### 2.3.2.3 Potencial hidrogeniônico

De acordo com Pereira Neto (2007), a faixa de potencial hidrogeniônico (pH) considerada ideal para a maioria dos microrganismos que atuam no processo de compostagem situa-se entre 5,5 e 8,0. Porém, como a maioria das enzimas encontra-se ativa no intervalo de pH entre 5,5 e 8,5, pode-se afirmar que o desenvolvimento dos microrganismos decompositores se estende por toda esta faixa de pH (Rodrigues et al., 2006). Em sistemas *CB*, é comum que no estágio inicial do processo de semi-compostagem sejam observados valores mais baixos de pH, haja vista que os materiais orgânicos utilizados como cama são de origem ácida (Damasceno, 2020).

Os valores de pH observados em sistemas *CB* variam bastante, de acordo com o estágio de desenvolvimento da semi-compostagem: na etapa inicial, há liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição da matéria orgânica, e o pH é predominantemente ácido; ao longo do processo, estes ácidos vão sendo consumidos, e o pH é elevado até níveis próximos do neutro; na etapa final, estes ácidos já foram totalmente consumidos, e o pH é ligeiramente alcalino (Hanajima et al., 2010; Damasceno, 2020).

Os microrganismos decompositores possuem certa capacidade de regulação do pH, por meio da degradação dos compostos orgânicos e geração de subprodutos ácidos ou básicos, conforme a necessidade do meio (Pereira Neto, 2007). Todavia, quando o pH apresenta valores muito altos, pode ocorrer elevada volatilização de amônia ( $\text{NH}_3$ ), especialmente quando o material for exposto ao ar – esvaziamento do *CB* para troca de cama e aplicação do composto gerado na lavoura (Russelle et al., 2007).

Alguns estudos realizados no Brasil mensuraram o pH da cama em sistemas *CB*. Fávero et al. (2015) conduziram estudos em sistemas *CB* localizados no Estado de São Paulo, e observaram que os valores médios de pH de amostras compostas (superfície + 0,20 m de profundidade) foram de 8,68, 8,71, 8,87 e 9,18, para os períodos de outono, inverno, primavera e verão, respectivamente. Oliveira et al. (2019b) avaliaram sistemas *CB* localizados no Sul do Estado de Minas Gerais, e observaram valores médios de pH da cama (0,2 m de profundidade) iguais a  $9,0 \pm 0,8$ . Radavelli et al. (2020) realizaram estudo em fazendas leiteiras localizadas no Oeste do Estado de Santa Catarina, e encontraram valores médios de pH da cama (0,2 m de profundidade) de  $8,7 \pm 0,5$ . Conforme estes autores, os elevados valores de pH encontrados nos

sistemas *CB* estudados são um indicativo de que a cama se encontrava no estágio final da semi-compostagem, e podem ser atribuídos ao prolongado tempo de uso do material de cama.

#### 2.3.2.4 Concentração de nutrientes

Um dos parâmetros utilizados para avaliar a composição de materiais orgânicos e os seus efeitos sobre o crescimento dos microrganismos decompositores é a relação carbono/nitrogênio (C/N). Sua utilização foi consolidada pelo fato da atividade de decomposição ser dependente do suprimento de C e N, utilizados para fornecimento de energia e síntese de proteínas, respectivamente (Sharma et al., 1997).

Em sistemas *CB*, Damasceno (2020) recomenda que a relação C/N do material a ser utilizado como cama seja determinada antes da sua utilização, para que seja realizado o balanço de nutrientes necessários na etapa inicial do processo de semi-compostagem. No início deste processo, recomenda-se que sejam fornecidas maiores relações C/N, entre 25/1 e 35/1, pois a maior parte do carbono assimilado (cerca de 66%) é eliminado para atmosfera na forma de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e apenas parte é imobilizado e incorporado ao protoplasma celular (Valente et al., 2009).

Neste tipo de sistema, o fornecimento de carbono é realizado por meio da adição de material orgânico (serragem, maravalha, casca de amendoim, casca de café etc.), ao passo que o nitrogênio é fornecido por meio das fezes e urina dos bovinos alojados. O montante de carbono necessário é função direta da quantidade de nitrogênio presente ou a ser adicionada via fezes e urina.

Com a degradação da matéria orgânica, que ocorre ao longo do processo de semi-compostagem, há redução do carbono orgânico (devido a conversão em CO<sub>2</sub>), aumento do nitrogênio total (devido a mineralização) e, conseqüentemente, redução da relação C/N (Damasceno, 2020). Ressalta-se que é importante manter o balanço C/N adequado, para que o processo de semi-compostagem não seja comprometido (Leso et al., 2020).

#### 2.3.2.5 Aeração

A aeração da cama é um outro fator de elevada importância para o processo de semi-compostagem, uma vez que é responsável pelo fornecimento de concentração adequada de oxigênio (O<sub>2</sub>) para os microrganismos decompositores, impedindo que sua atividade metabólica seja comprometida (Damasceno, 2020). Por meio da aeração, é possível controlar os níveis de

temperatura da cama, intensificar a velocidade de degradação do material e diminuir a umidade e presença de odores (Cotta et al., 2015).

De modo geral, a taxa de aeração necessária é função do tipo de material, das condições ambientais (temperatura e umidade) e do estágio em que se encontra o processo de semi-compostagem (Stentiford, 1996). Em sistemas *CB*, recomenda-se que seja mantida uma concentração mínima de oxigênio de 5% nos espaços intrapartículas presentes na cama, para que o processo de semi-compostagem ocorra (Damasceno, 2020).

O estado de compactação da cama interfere no seu nível de aeração. Diversos fatores podem ocasionar a compactação da cama em sistemas *CB*, sendo que a movimentação dos animais e o excesso de umidade da cama são os principais. Como consequência da compactação, ocorre redução da aeração da cama (menos espaço entre partículas) e o processo de compostagem pode ser comprometido (El Kader et al., 2007). Por este motivo, o material de cama deve ser revolvido diariamente, de duas a três vezes, com objetivo de manter a aeração adequada (Barberg et al., 2007b; Janni et al., 2007).

## **2.4 CAMA EM SISTEMAS *COMPOST BARN***

De acordo com Barberg et al. (2007b), para iniciar o ciclo de semi-compostagem em um sistema *CB* deve ser adicionada uma camada de cama com espessura de 0,30 a 0,45 m e, periodicamente (duas a cinco semanas), realizada reposição do material (camadas de 0,05 a 0,10 m). A cama pode ser definida como qualquer material orgânico, normalmente resíduos vegetais, que é depositado em uma área comum aos animais, onde podem se deitar, se movimentar e depositar fezes e urina (Damasceno, 2020).

Do ponto de vista de funcionamento de sistemas *CB*, vários fatores devem ser considerados, com destaque para a escolha de materiais de cama apropriados e a realização de manejo adequado às características da cama.

### **2.4.1 Materiais de cama**

De acordo com Petzen et al. (2009), materiais orgânicos com disponibilidade de carbono, capacidade de absorção de água, que não provoquem irritabilidade e possibilitem condições de conforto aos animais, podem ser utilizados como materiais de cama em sistemas *CB*. A escolha do melhor material de cama a ser utilizado deve considerar alguns fatores, tais como ser macio e confortável aos animais, possuir boa disponibilidade de nutrientes para os microrganismos decompositores, e apresentar bom custo-benefício (Damasceno, 2020).

Primariamente, o material escolhido deve atender as exigências de conforto dos animais alojados, haja vista que bovinos leiteiros em lactação passam a maior parte do tempo deitados sobre a cama e, portanto, necessitam de cama composta por material confortável. O material também deve assegurar a manutenção da superfície da cama seca, para evitar o crescimento de patógenos, reduzir os índices de sujidade e minimizar os riscos de ocorrência de mastite e de aumento da contagem de células somáticas (CCS) (Black et al., 2014; Damasceno, 2020). A disponibilidade de nutrientes é importante para que a semi-compostagem ocorra de maneira satisfatória, uma vez que os microrganismos atuantes requerem que o material a ser decomposto seja rico em nutrientes primários requeridos por eles (Budziak et al., 2004; Damasceno, 2020). Por fim, o material de cama escolhido deve possuir boa disponibilidade na região, bem como custo-benefício compatível, para que não se torne fator limitante e/ou de elevação de custos para o produtor.

De modo geral, os materiais utilizados como cama em sistemas *CB* são subprodutos de origem agroindustrial, por vezes produzidos nas próprias fazendas ou na região. Nos primeiros estudos realizados em sistemas *CB* nos Estados Unidos da América, relatou-se a utilização de serragem e maravalha de madeira como materiais de cama (Barberg et al., 2007a; Janni et al., 2007). De fato, a utilização deste material tem se mostrado satisfatória, notadamente por apresentar boa absorvência e forma estrutural, fatores que o tornam ideal para aplicação como material de cama (Petzen et al., 2009; Damasceno, 2020).

Os materiais mais comumente utilizados certamente são serragem e maravalha de madeira seca. Porém, notadamente para regiões de pouca oferta ou em épocas de escassez, outros resíduos podem ser utilizados com êxito (Shane et al., 2010). No Brasil, existem relatos da utilização de diversos materiais, tais como resíduos de beneficiamento da indústria madeireira (serragem, maravalha e aparas), cascas de arroz, de café e de amendoim, resíduos da indústria de cana-de-açúcar e palhadas de culturas em geral (Damasceno, 2020).

Sob condições brasileiras, pesquisadores realizaram estudos regionais em que foram levantados fatores como materiais de cama utilizados nos sistemas *CB*. Oliveira et al. (2019b) visitaram instalações no Sul de Minas Gerais e relataram a utilização dos materiais serragem, maravalha e casca de café, combinados ou não, como cama. Os pesquisadores destacaram que os principais materiais utilizados foram serragem e uma mistura de serragem com casca de café, que formavam o material de cama em 52,9 e 29,4% das instalações visitadas, respectivamente. Radavelli et al. (2020) conduziram estudo semelhante no Oeste de Santa Catarina e observaram que os principais materiais utilizados como cama na região eram serragem (70,0%) e uma combinação de serragem com maravalha (26,6%).

Em diversos países, estudos foram conduzidos com o objetivo de avaliar as propriedades dos materiais utilizados como substrato cama em sistemas *CB*, buscando correlações entre estes materiais e conforto, desempenho e produtividade dos animais, susceptibilidade à contaminação e doenças etc. (Eckelkamp et al., 2016; Ghielmetti et al., 2017; Albino et al., 2018; Kim et al., 2018; Borshch et al., 2019; Ferraz et al., 2020; Singh et al., 2020).

Todavia, dada a implantação relativamente recente dos sistemas *CB* no Brasil, poucos estudos foram realizados no sentido de avaliar os substratos utilizados nas camas das instalações brasileiras, sendo que o conhecimento atual se baseia principalmente nos relatos de produtores. Este é, portanto, um campo de pesquisa ainda com carência de investigações, necessárias para a construção do conhecimento técnico base, a ser utilizado para escolha dos melhores materiais e manejos de cama empregados em sistemas *CB* para a realidade climática brasileira.

#### **2.4.2 Manejo da cama**

De acordo com Leso et al. (2020), o manejo da cama em sistemas *CB* deve garantir o fornecimento de uma superfície higiênica e confortável aos animais. Deste modo, a manutenção da umidade da cama em níveis adequados é extremamente importante para a sanidade dos animais e qualidade do leite, haja vista que, quando o material de cama está úmido, tende a aderir na superfície corporal dos animais, aumentando sua sujidade, risco de mastite e contagem de células somáticas (CCS) (Janni et al., 2007; Black et al., 2014).

Em sistemas *CB*, de modo geral, o controle da umidade é realizado por meio da aplicação das seguintes práticas de manejo: controle da densidade de animais alojados; revolvimento do material de cama; adição de material seco; e promoção da adequada ventilação.

##### **2.4.2.1 Controle da densidade de animais alojados**

Um dos primeiros aspectos a serem considerados em relação ao manejo da cama em sistemas *CB* é a densidade de animais alojados. Ainda na fase projetual, o produtor deve definir a área mínima de cama a ser disponibilizada por animal, considerando aspectos como clima, porte, produtividade etc. (Damasceno, 2020). Como o número de animais alojados está diretamente associado com compactação da cama, quantidade de dejetos depositada, condições ambientais e taxa de ventilação fornecida (Leso et al., 2020), mesmo após a instalação construída deve-se avaliar este parâmetro e realizar as adequações de manejo necessárias.

Na literatura, são citados valores de 6,0 (vacas Jersey – Janni et al., 2007) a 15,0 m<sup>2</sup>. animal<sup>-1</sup> (vacas Holandesas – Galama, 2014). No Brasil, Oliveira et al. (2019b) e Radavelli et

al. (2020) conduziram estudos nos estados de Minas Gerais e Santa Catarina, e encontraram valores médios de área de cama disponível por animal de 10,2 e 15,2 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup>, respectivamente. No Estado de São Paulo, tem-se registros da utilização de até 19,0 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup> (Fávero et al., 2015). Dadas as variações climáticas que ocorrem ao longo do extenso território brasileiro, recomenda-se que a área mínima de cama disponível por animal seja de 10,0 m<sup>2</sup> (Damasceno, 2020).

Em relação a densidade de animais alojados, a pior situação que pode ocorrer é a de superlotação. Neste caso, pode ocorrer: compactação excessiva do material de cama, com consequente redução da porosidade e atividade dos microrganismos decompositores; aumento da umidade da cama e, como consequência, necessidade da realização de reposição com maior frequência; aumentos da condição de sujidade e do risco de mastite nos animais, bem como da CCS (Damasceno, 2020).

#### 2.4.2.2 Revolvimento do material de cama

Como forma de aumentar a atividade dos microrganismos decompositores aeróbios (micróbios e bactérias), a cama deve ser revolvida e aerada constantemente, para garantir o fornecimento de oxigênio (Black et al., 2013; Damasceno, 2020). De modo geral, recomenda-se que o revolvimento seja realizado de duas a três vezes ao dia, preferencialmente nos horários de ordenhas (Barberg et al., 2007b; Janni et al., 2007). Porém, como a frequência de revolvimento está diretamente relacionada com o estágio de desenvolvimento e condição de umidade da cama, inexistem um número de operações definido como padrão (Caldato et al., 2020; Damasceno, 2020). Em locais como Israel, por exemplo, o revolvimento da cama é realizada uma ou duas vezes ao dia, haja vista que as condições climáticas locais e o uso de maiores áreas de cama por animal possibilitam manter o material de cama seco (Klaas et al., 2010; Balcells et al., 2020).

No Brasil, com a variabilidade das condições climáticas encontradas ao longo do território, a frequência de revolvimento da cama também é bastante variável. Em instalações localizadas em Minas Gerais e São Paulo, o revolvimento da cama é realizado uma ou duas vezes ao dia, conforme a condição de umidade atual do material (Fávero et al., 2015; Damasceno et al., 2019; Oliveira et al., 2019a; Valente et al., 2020; Andrade et al., 2021). Em outros estados, como no Rio Grande do Sul, há relatos de que em algumas instalações o revolvimento está sendo realizado com maior frequência (três a quatro vezes ao dia), de acordo com o estágio de desenvolvimento da cama e época do ano (Malheiros & Konrad, 2019).

Janni et al. (2007) recomendaram que o revolvimento da cama fosse realizado na profundidade de 0,18 a 0,30 m, porém a espessura da camada revolvida é variável conforme manejo e tipo de implemento utilizados no sistema *CB*. De modo geral, o revolvimento da cama deve considerar seu aspecto físico, e a escolha do equipamento a ser utilizado é função das condições observadas (Damasceno, 2020).

Quando os primeiros sistemas *CB* foram implantados no Brasil, o revolvimento da cama era realizado utilizando equipamentos já disponíveis nas fazendas, tais como grades de discos, enxadas rotativas e escarificares (Figura 2.2) (Damasceno, 2020). Cada equipamento apresenta vantagens e limitações de uso, e a preferência pela utilização dá-se com base na experiência de uso dos produtores.

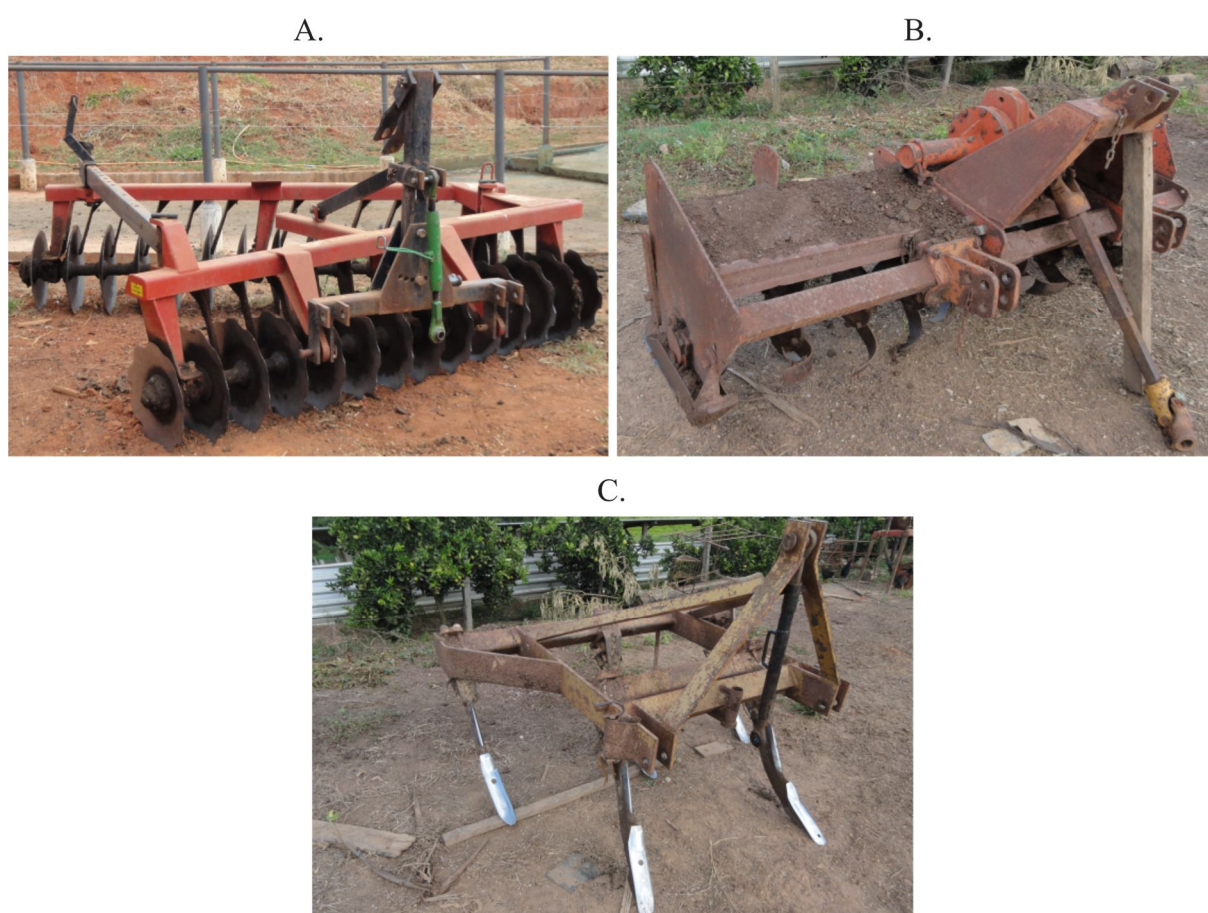


Figura 2.2. Equipamentos primários utilizados para revolvimento da cama em sistemas *Compost Barn*: grade de discos (A), enxada rotativa (B) e escarificador (C). Fonte: O autor (2022).

A grade de discos promove o revolvimento e/ou quebra das partículas na camada superficial da cama ( $< 0,15$  m), e é utilizada quando se deseja promover a quebra de camadas superficiais adensadas ou compactadas. A enxada rotativa também é utilizada quando se deseja revolver apenas a camada superficial ( $< 0,20$  m). É um equipamento que promove maior quebra

do material de cama e aumenta a aeração e a área superficial exposta para os microrganismos decompositores atuarem. Todavia, cabe destacar que o uso constante deste implemento pode promover a rápida degradação do material cama e acarretar formação de uma camada subsuperficial compactada. O uso do escarificador permite o revolvimento de camadas mais profundas (> 0,30 m), sem causar quebra excessiva das partículas, possibilitando aeração em profundidade e maior atividade de microrganismos decompositores (Janni et al., 2007; Damasceno, 2020). É um dos equipamentos mais utilizados no Brasil para revolvimento de sistemas *CB* (Oliveira et al., 2019b; Radavelli et al., 2020).

Os equipamentos utilizados para manejo da cama são tracionados por tratores agrícolas, geralmente da linha leve (51 a 80 cv) ou média (81 a 115 cv). Não é interessante que sejam utilizados tratores pesados, que podem acarretar compactação da cama, além de elevar os gastos com combustível (Damasceno, 2020).

Com o crescimento do uso de sistemas *CB* no Brasil, emergiu a necessidade do desenvolvimento de equipamentos específicos para revolvimento do material de cama. Nos últimos anos, muitas empresas têm estudado o revolvimento da cama em sistemas *CB*, e desenvolvido equipamentos inovadores específicos para este fim, algo pioneiro em todo o mundo. Dentre os equipamentos desenvolvidos, podem ser citados:

✓ **Enxada Rotativa *Compost Barn* ERCB-2000:**

Com largura de trabalho de 2,0 m, trata-se de um equipamento híbrido que combina quatro hastes escarificadores (profundidade regulável – 0,15 a 0,50 m), utilizadas para rompimento das camadas subsuperficiais, com um rotor equipado com facas de aço removíveis (profundidade de 0,01 a 0,11 m), para quebra de estruturas compactadas na superfície da cama (Figura 2.3A) (ACJ Indústria e Comércio de Peças e Máquinas Agrícolas, 2021).

✓ **Misturador de *Compost Barn* MCBF-2400:**

Desenvolvido pela empresa Farenzena Equipamentos (2021), é classificado como um subsolador com rolo destorroador, constituído por sete hastes subsoladoras (três posicionadas a frente e quatro atrás) e um rolo destorroador com lâminas retas (Figura 2.3B).

✓ **Escarificador de cama SME-2000:**

Composto por cinco hastes escarificadores reguláveis (profundidade máxima de 0,5 m) e dois rolos destorroadores com lâminas pontiagudas (profundidade de 0,10 m), o escarificador de cama SME-2000 foi desenvolvido no Paraná pela empresa Schemaq Indústria de Implementos Agrícolas (2021) (Figura 2.3C).

✓ **Revolvedor de cama STIR-2000:**

Desenvolvido para uso no revolvimento da cama em sistemas *CB*, é um equipamento híbrido, composto por cinco hastes escarificadoras e um rolo rotativo equipado com facas fixas não cortantes, para evitar quebra das partículas e formação de poeira (Figura 2.3D). Neste equipamento, a regulagem de profundidade é realizada hidraulicamente, podendo atingir profundidades de até 0,50 m (Haramaq Indústria de Máquinas Agrícolas, 2021).

✓ **Enxada rotativa *Compost Barn* SER-2000/2500 CB:**

Desenvolvida pela empresa SR Implementos (2021), a enxada rotativa SER-2000/2500 CB apresenta como principal diferencial a possibilidade de compra com diferentes larguras de atuação (2,0 e 2,5 m), se adaptando a realidade de cada produtor. Apesar de ser classificada como enxada rotativa, o equipamento apresenta hastes escarificadoras com regulagem de profundidade (até 0,5 m) e ponteiros substituíveis, facilitando a manutenção (Figura 2.3E).

✓ **Enxada rotativa *Compost Barn* ERP-175/200/225/250/275 BVRCG:**

Assim como as enxadas rotativas SER-2000/2500 CB e ERP-175/ 200/225/250/275 BVRCG também podem ser fabricadas com diferentes larguras de atuação (1,75 a 2,75 m) (Figura 2.3F). Equipado com hastes escarificadoras traseiras (4 a 6) e dianteiras (3 a 5), rolo destorroador com flanges (7 a 11) e lâminas (42 a 66), é um equipamento versátil, que se adapta bem aos diferentes sistemas *CB* (MEC-RUL Máquinas e Implementos Agrícolas, 2021).

✓ **Enxada rotativa ROTOPEC-2000:**

Equipado com quatro pás escarificadoras com regulagem de altura (0,10 a 0,45 m), bem como rolo destorroador com lâminas curvas dispostas em formato helicoidal e nivelador de cama, o ROTOPEC-2000 é um equipamento versátil, que atua na descompactação da camada subsuperficial e quebra de torrões na superfície da cama (Figura 2.3G). O equipamento foi desenvolvido no Estado de São Paulo, pela empresa Luma Implementos Agrícolas Ltda. (2021).

✓ **Misturador de cama Avassalador MC 2000 Plus:**

Desenvolvido pela empresa Mepel Máquinas e Equipamentos Ltda. (2021), é um equipamento híbrido, composto por cinco hastes escarificadoras reguláveis (até 0,30 m) e um rolo destorroador rotativo com facas retas (Figura 2.3H). Por meio de seus elementos ativos de revolvimento, o Avassalador MC 2000 Plus é capaz de romper camadas subsuperficiais compactadas na cama e quebrar torrões presentes na superfície, sem cortar excessivamente as partículas do material, aumentando o tempo de vida útil da cama.

✓ **Revolvedor de *Compost Barn* Vimaq:**

Baseado em um escarificador, mas com características próprias, como maior número de hastes (6 frontais e 7 traseiras, dispostas intercaladas), e possibilidade de ser equipado com um raspador de cama, o revolvedor de *Compost Barn* Vimaq pode atingir profundidades de até 0,3

m e ser utilizado para revolvimento da cama e/ou raspagem de corredor de alimentação (Figura 2.3I). O equipamento foi desenvolvido no Estado de Santa Catarina, pela Vimaq Máquinas Agrícolas Ltda. (2021).

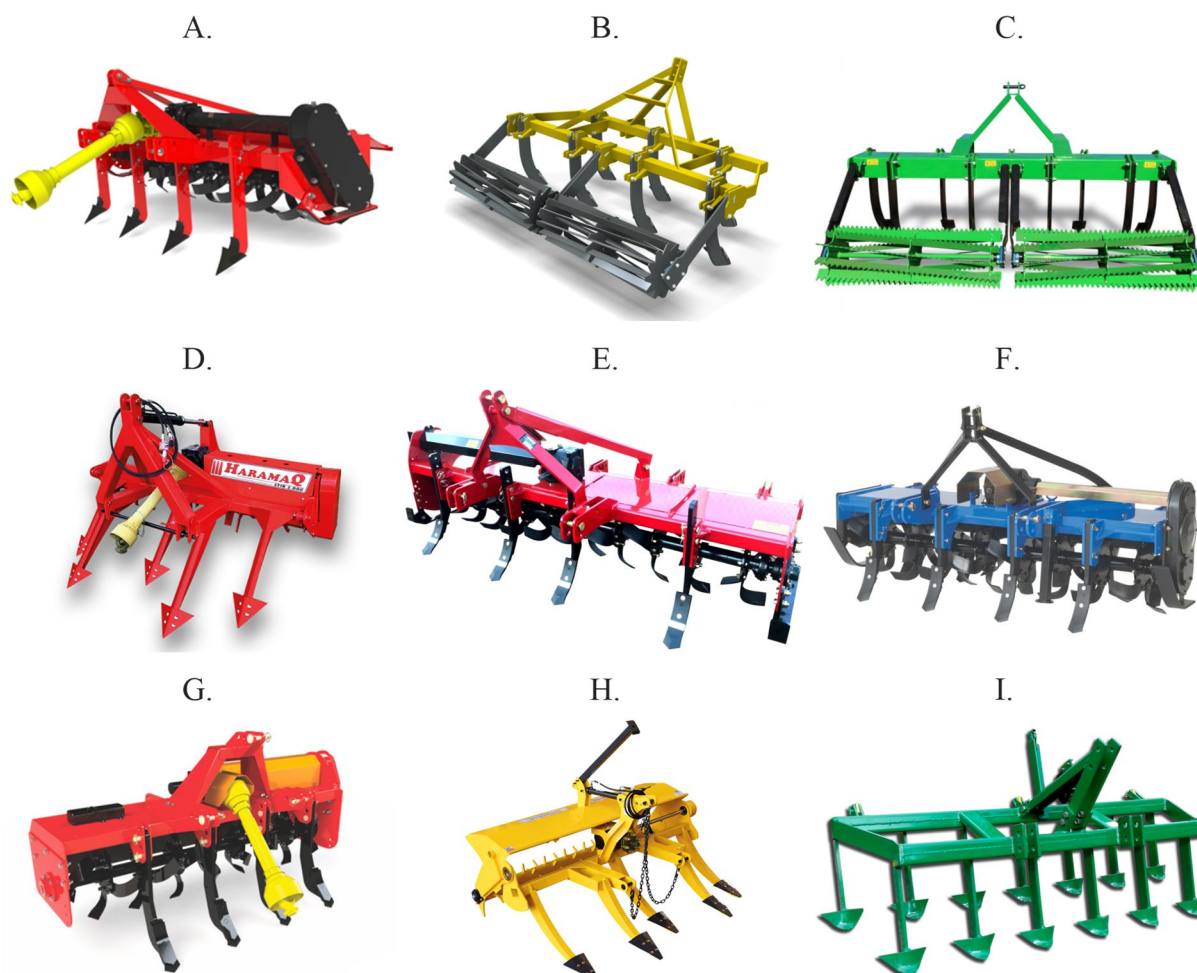


Figura 2.3. Inovações em equipamentos utilizados para revolvimento da cama em sistemas *Compost Barn*: enxada rotativa ERCB-2000 (A), misturador MCBF-2400 (B), escarificador de cama SME-2000 (C), revolvedor de cama STIR-2000 (D), enxada rotativa SER-2000/2500 CB (E), enxada rotativa ERP-175/200/225/250/275 BVRCG (F), enxada rotativa ROTOPEC-2000 (G), misturador de cama Avassalador MC 2000 PLUS (H) e revolvedor de *Compost Barn* Vimaq (I). Fonte: O autor – Adaptado dos catálogos de fabricantes (2022).

Estes são apenas alguns exemplos de equipamentos específicos desenvolvidos para uso no revolvimento da cama em sistemas *CB*. Com o crescente uso deste tipo de sistema no Brasil, ressalta-se que estão surgindo novos equipamentos, de uso regional ou comercialização nacional. Porém, independente do equipamento utilizado, deve-se estar atento para a correta regulagem dos elementos ativos de revolvimento (hastes escarificadoras, rolos destorroadores etc.), conforme as características da cama (umidade, presença de camadas compactadas, tipo de

material, profundidade etc.). Em todos os casos, a operação do equipamento e as manutenções periódicas são importantes e necessárias para o bom funcionamento do equipamento utilizado, e devem ser realizadas conforme as recomendações do fabricante (Damasceno, 2020).

#### 2.4.2.3 Adição de material seco

Outra prática de manejo necessária em sistemas *CB* é a reposição da cama utilizando material orgânico seco. Esta prática é muito utilizada em países de climas temperados, notadamente durante o período de inverno, em que o material de cama pode congelar durante a noite e descongelar durante o dia, aumentando a umidade (Black et al., 2013). Devido ao aumento de umidade, a adição de material seco é realizada com frequência duas a três vezes maior no período de inverno, com o objetivo de reduzir e/ou controlar a umidade da cama (Damasceno, 2020; Andrade et al., 2021).

Em regiões de climas tropical e subtropical, a reposição da cama com material seco também é uma prática importante para a manutenção da umidade da cama em níveis adequados. Nestes locais, a reposição também é realizada com maior frequência no período de inverno, em que as condições de temperatura e umidade dificultam a secagem do material de cama (Damasceno, 2020). Em sistemas *CB* fechados construídos no Brasil, Andrade et al. (2021) relatou que durante o período de umidade mais crítica da cama (inverno), as reposições ocorrem em intervalos de 12 a 15 dias.

## 2.5 TIPOLOGIA CONSTRUTIVA DE SISTEMAS *COMPOST BARN* NO BRASIL

Ao serem considerados sistemas *CB*, de modo geral, os aspectos construtivos são tão diversos quanto o número de instalações construídas, dado que em cada local são adotadas soluções arquitetônicas e/ou tecnológicas diferentes, adaptadas à realidade regional dos produtores de leite. Por certo, as características mundialmente comuns em sistemas *CB* são a extensa área de descanso e o manejo diário do material de cama, realizado por meio de seu revolvimento (Leso et al., 2020).

No Brasil, os primeiros sistemas *CB* construídos foram projetados de acordo com o modelo norte-americano, portanto idealizado para condições de climas temperados (Leso et al., 2020). Por muito tempo, informações técnicas relativas aos aspectos construtivos deste modelo de confinamento para condições brasileiras permaneceram escassas, apesar do crescimento contínuo do número de instalações. Com o avanço dos estudos na área, a partir de 2020 surgiram algumas publicações que tratam especificamente de sistemas *CB* no Brasil, com destaque para

o Livro “*Compost Barn* como alternativa para a pecuária leiteira”, de Damasceno (2020), o “Manual técnico de construção e manejo de *Compost Barn* para vacas leiteiras”, de (Caldato et al., 2020), e o livro “Unidades para produção animal – UPAs: Planejamento e projeto, de Souza et al. (2021).

De modo geral, os sistemas *CB* são compostos por áreas de descanso (cama), de alimentação e de trato, e projetados para que os animais permaneçam 100% do tempo confinados (Damasceno, 2020; Souza et al., 2021). Um bom projeto deve considerar aspectos simples e básicos, tais como forma, orientação, altura do pé-direito, uso de materiais adequados, presença de aberturas etc. (Renaudeau et al., 2012; Souza et al., 2021).

Do ponto de vista projetual e decidido o tamanho do rebanho a ser alojado em uma única instalação (que em geral deve abrigar um número de animais cerca de dez vezes maior que a capacidade da sala de ordenha, para otimização), a área de descanso é o primeiro parâmetro a ser dimensionado (Leso et al., 2020; Souza et al., 2021). Para seu dimensionamento, deve ser considerado o espaço mínimo disponível por animal, que deve permitir livre movimentação e acesso aos comedouros e bebedouros, bem como assegurar que o material de cama permaneça seco (Leso et al., 2020). Dadas as variações climáticas que são observadas ao longo do extenso território brasileiro, recomenda-se que a área de cama mínima disponível seja de 10,0 e 12,0  $\text{m}^2 \cdot \text{animal}^{-1}$ , para as regiões Centro-Oeste e Sudeste do país, respectivamente (Damasceno, 2020). Este é um parâmetro bastante variável, já havendo, na literatura, registros da utilização de áreas de cama de até 19,0  $\text{m}^2 \cdot \text{animal}^{-1}$ , no estado de São Paulo.

Definida a área de cama por animal e conhecido o número de bovinos leiteiros que será alojado, pode-se calcular a área total de descanso (cama), e determinar dimensões de comprimento e largura da instalação. Em relação ao comprimento, um aspecto importante a ser considerado é o espaço mínimo de comedouro disponível por animal, que deve permitir livre acesso dos animais a alimentação (Damasceno, 2020). De modo geral, os comedouros estão localizados em uma das laterais da instalação e, deste modo, o comprimento mínimo do sistema é dado pelo produto entre o número de animais alojados e o espaço mínimo de comedouro a ser disponibilizado por animal ( $\geq 0,7$  m) (Bewley et al., 2012). Conhecidas área total de cama e comprimento da instalação, pode-se determinar a sua largura.

Oliveira et al. (2019b) realizaram estudos de caracterização de sistemas *CB* no Sul do Estado de Minas Gerais, e observaram que o comprimento e a largura médios das instalações da região eram  $64,1 \pm 27,1$  m e  $17,7 \pm 4,1$  m, respectivamente. Radavelli et al. (2020) avaliaram aspectos construtivos, manejo e características do rebanho de animais alojados em sistemas *CB* no Oeste do Estado de Santa Catarina, e relataram instalações com comprimento e largura

médios de  $43,5 \pm 20,1$  m e  $20,2 \pm 7,4$  m e, respectivamente. Em outros locais, são encontradas diferentes instalações, por vezes adaptadas às condições locais, mas sempre dentro das faixas citadas pelos autores.

Outros aspectos importantes na fase inicial do projeto são a escolha do local de construção e da orientação da instalação, notadamente caso opte-se pela implantação sistemas *CB* com laterais abertas. É preferível que as instalações sejam construídas em local com boa drenagem, bem ventilado e longe de nascentes, rios ou áreas de proteção, para evitar contaminação ambiental. Recomenda-se ainda que o eixo longitudinal da cumeeira seja orientado no sentido Leste-Oeste, com o objetivo de reduzir a incidência de radiação solar direta dentro da instalação e melhor aproveitar as correntes de ar (Baêta & Souza, 2010; Damasceno, 2020; Souza et al., 2021).

Para favorecer a ventilação natural, o pé-direito deve ser definido com base da largura do sistema. Recomenda-se que seja utilizado o valor mínimo de 4,0 m e máximo de 5,5 m, considerando-se sempre o emprego de fechamentos laterais e/ou cortinas móveis na parte superior dos oitões, buscando-se evitar a entrada de radiação solar direta e de água da chuva (Caldato et al., 2020; Damasceno, 2020; Souza et al., 2021).

Os tipos de telhados empregados são muito variáveis e dependentes de fatores como clima, índices pluviométricos, velocidade do vento etc. (Galama et al., 2020). Sob condições brasileiras, é comum serem empregados telhados em duas águas, com ou sem presença de lanternins centrais, mas também são encontrados outros tipos, tais como telhado em arco.

Os materiais de cobertura mais comumente utilizados são aço galvanizado e alumínio que, apesar de apresentarem menor custo, propiciam baixo isolamento térmico e podem ocasionar barulho excessivo em condições de chuva, que é estressante aos animais (Baêta & Souza, 2010; Damasceno, 2020). Em regiões de climas quentes, o emprego de materiais de cobertura com maior resistência térmica possibilita a melhoria das condições de conforto térmico, haja vista que reduz o fluxo de calor do exterior para o interior das instalações (Menconi & Grohmann, 2014). Com relação a inclinação do telhado, esta varia conforme o tipo de telha empregada, de  $15^\circ$  para telhas em chapa ou planas (aço-galvanizado, fibrocimento etc.) a  $25^\circ$  para telhas pequenas (cerâmica, concreto etc.) (Souza et al., 2021).

É recomendável ainda que sejam utilizados beirais com no mínimo 0,9 m, para evitar a entrada de água, em caso de ocorrência de precipitação (Bewley et al., 2012). Em instalações *CB* localizados no Sul do Estado de Minas Gerais, Oliveira et al. (2019b) relataram que há predomínio de beirais com largura entre 2,0 e 3,0 m.

Normalmente, o corredor de alimentação fica localizado em uma das laterais da instalação, preferencialmente naquela com menor incidência de radiação solar. Recomenda-se que este corredor possua largura mínima de 4,0 m, com passagens de acesso para a área de cama nas extremidades e a cada 10,0 m, para garantir livre acesso dos animais aos comedouros e bebedouros. É importante também que seja revestido com concreto frisado, utilizando material com boa resistência, estabilidade e baixa aspereza, para evitar desgaste excessivo dos cascos, escorregões e facilitar a limpeza (Damasceno, 2020; Souza et al., 2021).

Em estudos realizados nos estados de Minas Gerais e Santa Catarina, pesquisadores relataram que os corredores de alimentação dos sistemas *CB* estudados apresentavam larguras médias de  $3,3 \pm 0,7$  m e  $3,4 \pm 1,8$  m, respectivamente (Oliveira et al., 2019b; Radavelli et al., 2020). É importante destacar que a utilização de corredores de alimentação com largura inferior a recomendada pode ser fator limitante ao acesso aos comedouros e bebedouros em horários de maior demanda, haja vista que em qualquer grupo de animais existem animais dominantes, que podem monopolizar o acesso a estes locais (Caldato et al., 2020; Souza et al., 2021).

Os bebedouros devem fornecer água em qualidade e quantidade necessárias, bem como não apresentar vazamentos (Damasceno, 2020). Recomenda-se que sejam fornecido de 0,6 a 1,0 m linear de bebedouros para cada grupo de 15 animais (Bewley et al., 2012), e estejam localizados em local acessível, preferencialmente no corredor de alimentação. Deve-se sempre assegurar que os animais não tenham acesso direto da área da cama, pois podem derramar água sobre a cama e causar o aumento da umidade (Janni et al., 2007; Bewley et al., 2012; Leso et al., 2020).

Nas laterais das instalações, é recomendável que sejam construídas muretas com cerca de 0,3 m, que devem evitar a entrada de água e a perda de material de cama para as laterais, mas não limitar a circulação de ar (Damasceno, 2020). Nas passagens de acesso entre o corredor de alimentação e a área de cama, também é importante que seja construída uma pequena mureta (cerca de 0,2 m), para retenção dos dejetos depositados no corredor de alimentação, funcionando como uma barreira física à passagem de umidade (Bewley et al., 2012; Black et al., 2014; Damasceno, 2020).

## **2.6 ACONDICIONAMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS *COMPOST BARN***

Em locais de climas quentes, como no Brasil, os efeitos dos fatores ambientais prejudiciais à produção, como elevadas temperaturas e umidades do ar, devem ser amenizados por meio de medidas de melhorias nas instalações e no manejo (Nascimento et al., 2014). As medidas adotadas devem ser efetivas em possibilitar a minimização do estresse térmico, de

modo que os animais possam expressar ao máximo o seu desempenho produtivo e reprodutivo (Baêta & Souza, 2010).

Diversos artificios têm sido utilizados nos sistemas intensivos de produção animal em climas quentes, com o objetivo de melhorar as condições térmicas, destacando-se as técnicas de ventilação e resfriamento do ar (Nääs & Arcaro Júnior, 2001).

Nos sistemas *CB*, a ventilação é muito importante para o sucesso da atividade de produção de leite, uma vez que tem influência direta sobre conforto térmico, qualidade do ar, secagem da cama e eficiência energética (Janni et al., 2007; Norton et al., 2007; Lobeck et al., 2011; Guerra-Galdo et al., 2015). Nestes sistemas, o processo de ventilação é variável de acordo com a concepção de projeto adotada, podendo ser classificado em dois diferentes tipos:

- a. Sistemas *CB* com laterais abertas, ventilação do tipo pressão positiva, com aproveitamento do efeito das correntes naturais de ar e/ou complementação por meio de ventilação mecânica; e
- b. Sistemas *CB* totalmente fechados, com ventilação mecânica do tipo pressão negativa, nos quais volume e vazão de ar que entram e saem são controlados.

### **2.6.1 Ventilação em sistemas *Compost Barn* com laterais abertas**

Em sistemas *CB*, de modo geral, primariamente deve-se considerar o aproveitamento da ventilação natural. Para tanto, devem ser explorados aspectos como características construtivas, orientação e localização da instalação, fatores que podem ter importante contribuição para a movimentação de ar, de acordo com o local onde a instalação *CB* foi ou será construída (Janni et al., 2007).

De forma didática, os sistemas de ventilação são classificados em naturais e mecânicos, com base no tipo de força motriz empregada para causar a movimentação de ar (Albright, 1990; Norton et al., 2007).

Sistemas naturais de ventilação são aqueles em que a movimentação de ar têm como força motriz as diferenças de pressão e/ou temperatura entre dois locais considerados, podendo ser dos tipos natural dinâmica e natural térmica, que podem ocorrer de maneira isolada ou combinada. Quando a movimentação do ar é causada pela diferença de pressão entre dois locais, a ventilação atuante recebe o nome de ventilação natural dinâmica, por ser causada pela ação dinâmica dos ventos. Por outro lado, quando esta movimentação é resultado da diferença de temperatura, a ventilação recebe o nome de ventilação natural térmica (Baêta & Souza, 2010; Lukiantchuki et al., 2016).

No caso da ventilação natural dinâmica, diversos fatores influenciam a taxa com as movimentações de ar ocorrem, especialmente velocidade e direção do vento no local, e presença de obstáculos e aberturas para entrada e saída de ar. Para que este tipo de ventilação seja eficiente, as aberturas para entrada e saída de ar devem ser perpendiculares a direção do vento e opostas umas às outras, de modo que se possa gerar um fluxo cruzado (Baêta & Souza, 2010). Na Figura 2.4A está ilustrada a representação esquemática de uma instalação *CB* com laterais abertas, orientada no sentido Leste-Oeste, construída em região com predominância de ventos Leste-Oeste, distante de barreiras de impedimento à circulação de ar, e com aproveitamento da ventilação natural dinâmica. No caso exemplificado, a pressão é positiva na região próxima da face Leste, e negativa na região próxima da face Oeste. Esta diferença de pressão causará a movimentação de ar ao longo do comprimento da instalação.

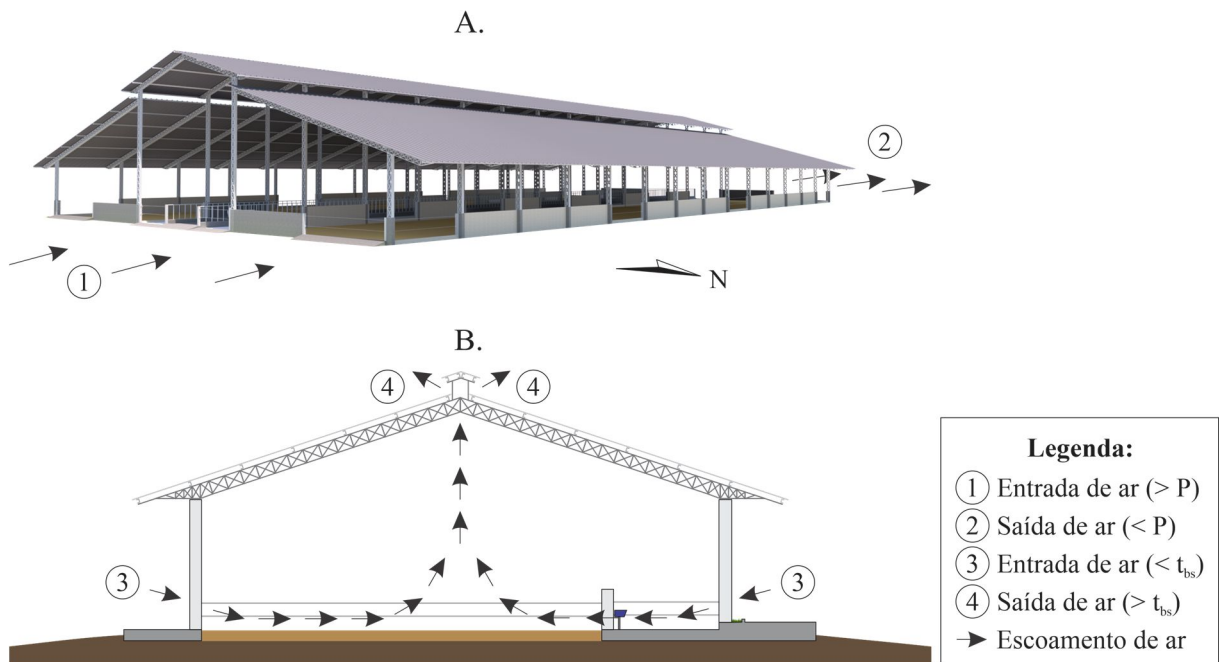


Figura 2.4. Representação esquemática dos deslocamentos naturais de massas de ar em sistemas *Compost Barn* devido as diferenças de pressão (A) e de temperatura (B) entre dois pontos considerados. \*N – indicação do Norte; P – pressão;  $t_{bs}$  – temperatura do ar. Fonte: O autor (2022).

As aberturas presentes nas instalações podem intensificar ou limitar a ventilação natural dinâmica. Quando as aberturas para entrada de ar se encontram adequadamente dispostas, em regiões opostas e na direção dos ventos dominantes, a ventilação natural dinâmica pode ser maximizada (Baêta & Souza, 2010). Todavia, cabe salientar que a ventilação natural dinâmica é influenciada por diversos fatores, tais como velocidade e direção do vento no entorno da instalação, presença e distância de obstáculos, localização da construção, entre outros (Tinôco,

2001; Baêta & Souza, 2010), fazendo com que nem sempre seja efetiva em melhorar o conforto térmico no interior das instalações de produção animal.

A ventilação natural térmica, por outro lado, ocorre devido as diferenças de temperatura no interior da instalação, que causam variações de densidade do ar, provocam diferenças de pressão e possibilitam a ocorrência do chamado “efeito termossifão” ou “efeito chaminé” (Lukiantchuki et al., 2016). O efeito termossifão é um fenômeno que ocorre quando o ar no interior da instalação está mais aquecido que o ar exterior, e tende a se movimentar para a parte superior da edificação, provocando a formação de gradientes de pressão (Vilela et al., 2020).

Quando a temperatura no interior da instalação é superior a temperatura externa e a instalação possui aberturas próximas ao piso e teto, o ar quente (menos denso), tenderá a escapar pelas aberturas superiores. A partir da sua movimentação, o ar externo, mais frio e denso, tende a entrar pelas aberturas inferiores, ocasionando a renovação no interior da instalação. A quantidade, localização e dimensões das aberturas de entrada e saída de ar tem influência direta sobre a taxa de ventilação alcançada (Nääs, 1989; Baêta & Souza, 2010; Damasceno, 2020). Na Figura 2.4B está ilustrada a representação esquemática de uma instalação *CB* com laterais abertas e presença de lanternim, na qual, devido as condições ambientais, há ocorrência do efeito termossifão e aproveitamento da ventilação natural térmica.

Para condições norte-americanas, Damasceno et al. (2020) utilizaram as técnicas de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para avaliar a ventilação natural em modelos reduzidos de instalações *CB* com diferentes aberturas no telhado e considerando distintas direções do vento. Os autores concluíram que, para condições de vento de Oeste para Leste (maiores velocidades do ar alcançadas), a melhor configuração de telhado era aquela com presença de abertura central e chaminé.

Em sistemas *CB* construídos no Brasil, de modo geral, a utilização apenas da ventilação natural não permite a manutenção permanente de fatores como conforto térmico, qualidade do ar e secagem da cama. Em alguns períodos do ano, notadamente no verão, as elevadas temperaturas registradas fazem com que estes fatores não estejam dentro da faixa adequada, causando quedas de produtividade, qualidade do leite e sanidade do rebanho, e gerando prejuízos econômicos (Caldato et al., 2020). Quando as condições naturais de ventilação não possibilitam adequada movimentação de ar no interior da instalação, lança-se mão do uso de sistemas de ventilação mecânica (Damasceno, 2020).

Sistemas de ventilação mecânica, artificial ou forçada, são aqueles que se utilizam de equipamentos acionados eletricamente (ventiladores e exaustores), para causar movimentação de ar ao longo de regiões de interesse (Norton et al., 2007). São utilizados sempre que o local

da instalação não possibilita condições adequadas de ventilação natural, ou quando o projeto não priorizou a utilização da ventilação natural de maneira eficiente (Morais & Labaki, 2017).

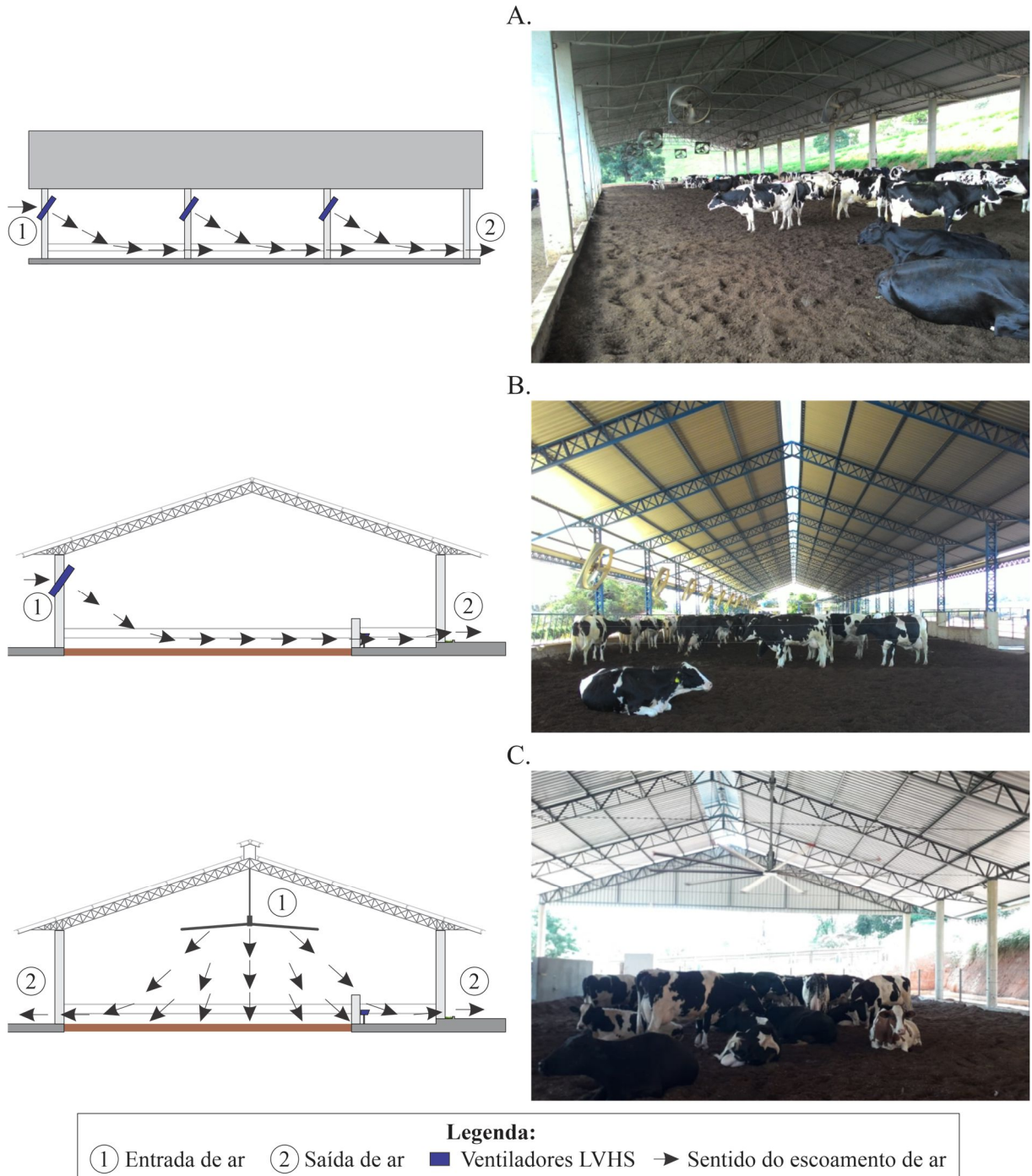


Figura 2.5. Representação e exemplos de sistemas *Compost Barn* com ventilação por pressão positiva dos tipos baixo volume e alta rotação (*LVHS*), com ventiladores instalados na longitudinal (A) e transversal (B), e alto volume e baixa rotação (*HVLS*) (C). Fonte: O autor (2022).

Em instalações *CB* com laterais abertas, normalmente são empregados sistemas mecânicos de ventilação por pressão positiva, com uso de ventiladores de baixo volume e alta

rotação (*LVHS*) ou de alto volume e baixa rotação (*HVLS*) (Leso et al., 2018). Neste tipo de sistema, ventiladores forçam o ar da região externa para o interior da instalação, causando aumento da velocidade do ar (Figura 2.5) (Damasceno, 2020).

A forma mais comum de ventilação por pressão positiva é realizada por meio do uso de ventiladores do tipo *LVHS*. Neste caso, os equipamentos são instalados na longitudinal (mais comum) ou transversal, sempre no sentido dos ventos dominantes e direcionando o ar externo para o interior da instalação (Damasceno, 2020). Nas Figuras 2.5A e 2.5B estão ilustradas representações esquemáticas dos dois casos mencionados, bem como fotos de sistemas *CB* com uso de ventiladores *LVHS*.

Apesar da menor utilização de ventiladores do tipo *HVLS*, quando comparados com os *LVHS*, o uso deste primeiro tipo tem crescido no Brasil nos últimos anos, especialmente por serem considerados mais econômicos. Este tipo de ventilador atua forçando o movimento de grandes massas de ar da região do ático para a cama (Figura 2.5C), e opera a baixa pressão, geralmente 0,5 Pa (Damasceno, 2020).

No Brasil, onde há predomínio do uso de instalações *CB* com laterais abertas, os sistemas de ventilação mecânica por pressão positiva estão presentes na maioria das instalações. Em um levantamento realizado no Sul de Minas Gerais, Oliveira et al. (2019b) observaram que 88,2% das instalações *CB* visitadas possuíam ventilação por pressão positiva, com destaque para o tipo *LVHS*, que estava presente em 74,6% das instalações. Radavelli et al. (2020) realizaram um levantamento em sistemas *CB* localizadas no Oeste do Estado de Santa Catarina, e observaram que em 100% das instalações o sistema de ventilação era realizado por pressão positiva, com destaque também para o tipo *LVHS*, presente em 94,4% das instalações visitadas.

De acordo Black et al. (2013), em sistemas *CB* é desejável que a velocidade do ar seja mantida próxima de  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em toda a zona ocupada pelos animais (ZOA), possibilitando secar a cama, remover gases e favorecer as trocas térmicas. Deste modo, além da escolha do tipo de ventilador adequado a ser utilizado, outro fator de elevada importância é a disposição dos equipamentos ao longo da instalação, que deve garantir condições homogêneas de ventilação, para que seja evitada a formação de regiões com baixas velocidades do ar, preteridas pelos animais e propensas a apresentarem problemas de secagem da cama (Bewley et al., 2012). De maneira análoga, zonas com excessiva velocidade do ar ( $> 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) também devem ser evitadas. Portanto, em sistemas *CB* é essencial que sejam realizados procedimentos de avaliação da eficiência de ventilação, que podem ser utilizados para verificar se o sistema de ventilação empregado está adequado às necessidades térmicas e de secagem da cama, bem como se há necessidade da realização de ajustes no projeto e/ou manejo da instalação.

### 2.6.2 Ventilação em sistemas *Compost Barn* totalmente fechados

Visando controle ainda maior das condições térmicas, nos últimos anos foram introduzidas no Brasil os primeiros sistemas *CB* totalmente fechados e climatizados, com ventilação do tipo pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo (Figura 2.6) (Damasceno et al., 2019; Valente et al., 2020; Andrade, 2021). Este modelo de instalação para alojamento de bovinos leiteiros originalmente foi concebido e amplamente adotado em países de climas temperados, especialmente na Europa e América do Norte, regiões estas caracterizadas por grandes amplitudes térmicas. Neste sistema, o ar a ser resfriado é colocado em contato com a água e, durante o processo de evaporação, o calor sensível é convertido em calor latente, possibilitando a redução da temperatura do ar (Nääs & Arcaro Júnior, 2001; Baêta & Souza, 2010).

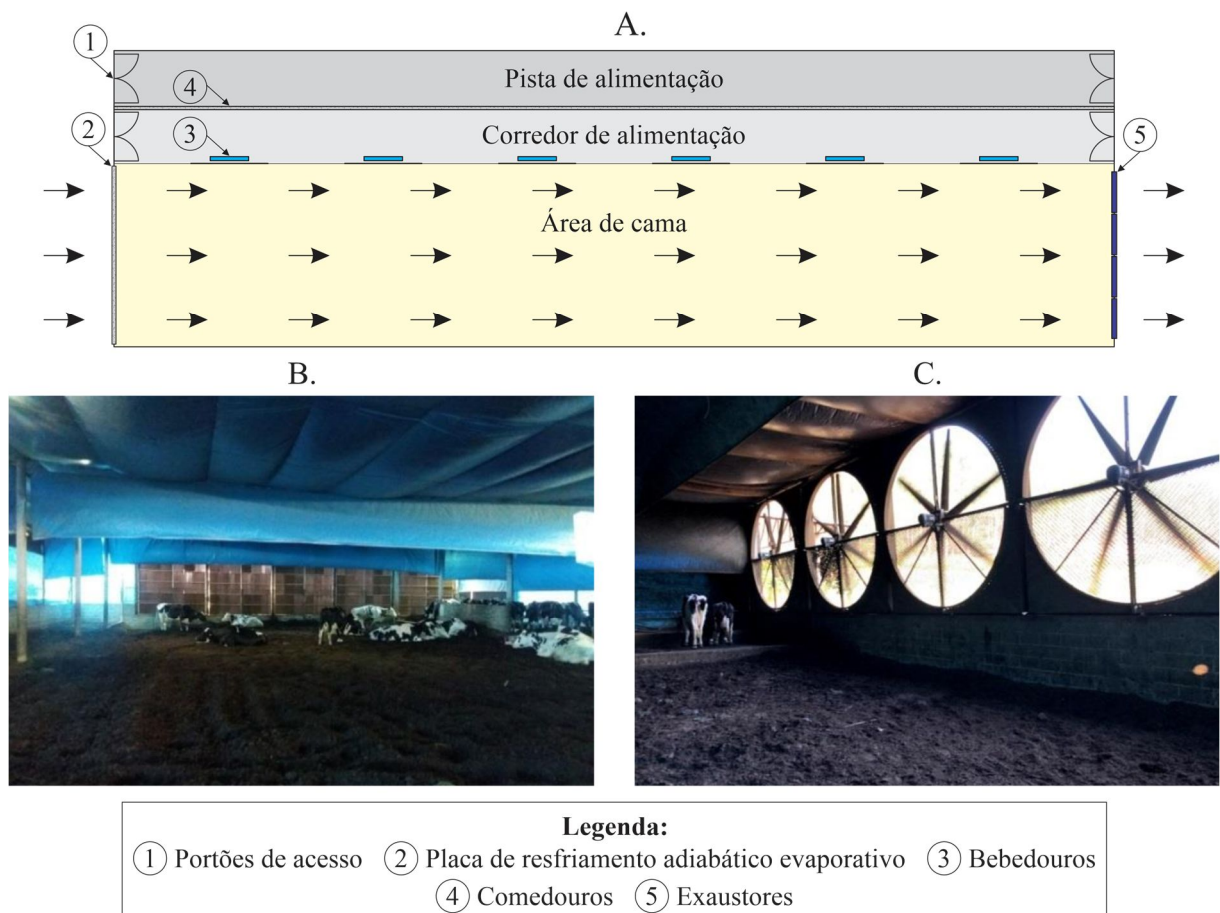


Figura 2.6. Sistema *Compost Barn* fechado com ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático: representação esquemática do escoamento de ar (A) e instalação fechada em Cajuri – MG, com destaque para a placa de resfriamento adiabático evaporativo (B) e exaustores (C). Fonte: O autor (2022)/ Andrade (2021).

Cabe destacar que os sistemas *CB* fechados e climatizados foram implantados no Brasil sem realização de estudos prévios de verificação da sua adequação às condições climáticas do país, cabendo a realização de pesquisas em instalações deste tipo. Por meio do uso deste sistema, espera-se que temperatura e velocidade do ar sejam mantidas dentro da faixa considerada adequada. Todavia, o seu uso implica na necessidade constante de avaliação das variáveis ambientais e concentrações gases, visando garantir qualidade do ar e níveis adequados de umidade da cama no interior da instalação (Damasceno et al., 2019; Andrade, 2021).

Buscando a obtenção de maiores informações sobre o funcionamento dos sistemas *CB* totalmente fechados implantados sob condições climáticas brasileiras, algumas pesquisas foram e vem sendo realizadas em instalações deste tipo. Como exemplos, podem ser citados os estudos conduzidos por Damasceno et al. (2019), Valente et al. (2020) e Andrade (2021).

Damasceno et al. (2019) avaliaram a distribuição espacial das variáveis térmicas, acústicas e luminosas em sistema *CB* fechado e climatizado durante o período de Primavera. Os autores observaram que, mesmo com uso de ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo, em alguns locais as condições ambientais (temperatura e umidade) estavam acima dos níveis adequados para bovinos leiteiros em lactação.

Valente et al. (2020) analisaram o desempenho de animais em sistemas *CB* totalmente abertos e sem ventilação mecânica e totalmente fechados e climatizados, e concluíram que o uso do sistema fechado com ventilação por pressão negativa não elevou a produtividade dos animais, não justificando o alto investimento inicial.

Andrade (2021) conduziu um estudo de avaliação da distribuição espacial das variáveis térmico-ambientais, qualidade de cama e indicadores de bem-estar de bovinos leiteiros em lactação alojados em sistema *Compost Barn* fechado (*CBF*), com ventilação negativa em túnel associada ao resfriamento adiabático evaporativo (RAE). Foi observado que, mesmo com uso de ventilação mecânica associada ao RAE, durante as tardes de verão toda a área interna da instalação apresentou condições de desconforto. Por meio dos resultados alcançados, concluiu-se que da forma que o sistema *CBF* estudado foi concebido e operado, não foi eficiente em manter as variáveis microclimáticas e qualidade de cama dentro da faixa recomendada.

Dado o elevado interesse dos pesquisadores atuantes na área, se espera que nos próximos anos as pesquisas sobre ventilação em sistemas *CB* avancem, servindo como base para escolha dos melhores sistemas de ventilação a serem utilizados, adaptados à realidade regional de cada produtor.

## 2.7 AMBIENTE TÉRMICO EM SISTEMAS *COMPOST BARN*

Diversos fatores exercem influência sobre a produtividade de bovinos leiteiros, com destaque para raça, ambiente e práticas de manejo (Dalcin et al., 2016). Em locais de climas tropical e subtropical, como é o caso do Brasil, a atividade de produção de leite é particularmente desafiadora quando são explorados bovinos leiteiros de origem europeia, aclimatados geneticamente para condições de frio. Neste caso, as altas temperaturas causam estresse térmico e, como consequência, ocorre redução da produtividade e eficiência reprodutiva dos animais (Vasconcelos & Demétrio, 2011).

A solução prioritária é a adoção de sistemas de confinamento, que possibilitam melhorar e/ou controlar as condições ambientais (Perissinotto et al., 2009). Em todos os casos, a avaliação do ambiente é de suma importância para o sucesso do sistema de confinamento, haja vista que pode ser utilizada como base para a formulação de projetos adequados às condições climáticas e raça animal alojada, bem como para a identificação da necessidade de alterações no manejo e emprego de tecnologias de arrefecimento ou aquecimento térmico (Damasceno, 2020). Esta avaliação pode ser realizada por meio de variáveis térmico ambientais, tais como temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ), umidade relativa (UR) e velocidade do ar ( $v_{ar}$ ), e/ou índices de conforto térmico, utilizando-se diferentes metodologias.

### 2.7.1 Avaliação do ambiente térmico por meio de temperatura e umidade relativa do ar

Bovinos leiteiros são animais homeotermos, ou seja, que possuem capacidade de manter a temperatura do núcleo corporal aproximadamente constante, por meio de processos de aumento ou redução do calor resultante do metabolismo, e da conservação ou dissipação de calor para o meio externo (Baêta & Souza, 2010). Todavia, o processo de homeotermia só é eficiente quando a temperatura do ambiente é mantida dentro da zona de termoneutralidade ou de conforto térmico (ZCT) da espécie em questão, ou seja, dentro da faixa de temperatura em que não necessitam realizar alterações metabólicas para aquecimento e/ou resfriamento (Souza, 2005). Quando a temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e a umidade relativa do ar (UR) estão fora faixa de termoneutralidade, a capacidade do animal de dissipar ou gerar calor é reduzida e, portanto, está propenso ao sofrimento por estresse térmico (Dash et al., 2016).

Para bovinos leiteiros, a literatura é bastante vasta quando se trata de delimitar faixas de  $t_{bs}$  e UR consideradas termoneutras e de conforto térmico. Na Tabela 2.2 estão listados valores de  $t_{bs}$  e UR que delimitam as faixas de conforto térmico e de termoneutralidade para bovinos leiteiros, de acordo com diversos autores.

Tabela 2.2. Valores de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em °C) e umidade relativa do ar (UR, em %) que delimitam as faixas de conforto térmico e termoneutralidade para bovinos leiteiros.

| Publicação<br>(Autores/ano)     | Categoria                          | Faixa               |                    | Descrição                                                                  |
|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|--------------------|----------------------------------------------------------------------------|
|                                 |                                    | $t_{bs}$ (°C)       | UR (%)             |                                                                            |
| Berman et al.<br>(1985)         | Vacas<br>Holandesas em<br>lactação | 25 a 26             | –                  | Limite superior de<br>temperatura (independente<br>de produtividade)       |
| Nääs (1989)                     | Animais<br>ruminantes              | 13 a 18<br>4 a 24   | –<br>75            | Zona de conforto térmico<br>Limites de temperatura e<br>umidade (superior) |
| Bucklin et al.<br>(1991)        | Vacas em<br>lactação               | 24 a 27             | –                  | Temperatura crítica superior                                               |
| Igono et al.<br>(1992)          | Vacas<br>Holandesas                | 27                  | –                  | Temperatura crítica superior                                               |
| Cortez &<br>Magalhães<br>(1993) | Vacas leiteiras                    | 12 a 18<br>– 5 a 25 | 70 a 80<br>30 a 80 | Zona de conforto térmico<br>Zona de termoneutralidade                      |
| Roefeldt<br>(1998)              | Vacas em<br>lactação               | 5 a 25              | –                  | Zona de termoneutralidade                                                  |
| West (2003)                     | Vacas leiteiras                    | 26 a 26             | –                  | Temperatura crítica superior                                               |
| Perissinotto &<br>Moura (2007)  | Vacas leiteiras                    | 22                  | –                  | Limite superior de<br>temperatura (Independente<br>de da umidade relativa) |
| Baêta & Souza<br>(2010)         | Vacas<br>europeias                 | –1 a 16             | –                  | Zona de conforto térmico                                                   |

Para condições climáticas brasileiras, estudos de avaliação do ambiente térmico em sistemas *CB* têm sido realizados em diversos locais, indicando a ocorrência de diferentes situações de conforto. Entre os estudos conduzidos, pode-se citar o realizado por Yameogo et al. (2021) em um sistema *CB* totalmente fechado localizado no estado de Minas Gerais, durante o período de inverno. No interior da instalação, que contava com sistema de ventilação por pressão negativa associado ao resfriamento adiabático evaporativo, os autores observaram que foi registrado valor médio para  $t_{bs}$  igual a 16.0 °C, estando dentro da ZCT, caracterizada como adequada para a produção de leite. Todavia, os autores observaram também que a média de UR registrada foi 77,7%, valor superior a UR máxima desejada em instalações para bovinos

leiteiros em lactação (75,0%) e, portanto, passível de ter comprometido a eficiência do sistema de resfriamento.

### 2.7.2 Avaliação do ambiente térmico por meio de índices de conforto térmico

Em sistemas de produção animal, os elementos climáticos podem ser utilizados para avaliar as condições ambientais, possibilitando definir técnicas de manejo e tecnologias de acondicionamento necessárias à melhoria do ambiente de produção. Certamente, a temperatura do ar é o elemento com maior influência sobre o animal, mas a avaliação do ambiente torna-se muito mais abrangente ao serem considerados outros elementos, como umidade relativa do ar, velocidade do ar e energia radiante (Baêta & Souza, 2010; Damasceno, 2020).

Neste sentido, foram desenvolvidos Índices de Conforto Térmico (ICTs), também chamados de Índices Bioclimáticos, que buscam englobar, em um único parâmetro, o efeito combinado de diferentes elementos climáticos e do ambiente construído (Curtis, 1983; Perissinotto et al., 2009). Por meio do uso dos ICTs, busca-se relacionar fatores e condições que proporcionam respostas iguais nos animais, e avaliar as condições no ambiente de produção. Em sua composição, são utilizados elementos climáticos como temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ), umidade reativa do ar (UR), velocidade do ar ( $v_{ar}$ ) e radiação solar. Cada elemento recebe um determinado peso na composição do ICTs, conforme sua importância em relação ao conforto dos animais alojados (Sampaio et al., 2004).

Um dos principais índices utilizados para avaliação do ambiente em sistemas de produção animal é o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), desenvolvido por Thom (1959), originalmente para suínos. ITU foi adaptado para bovinos leiteiros por Berry et al. (1964), e tem sido amplamente utilizado para avaliação do conforto térmico em sistemas de confinamento aplicados à produção de leite.

O ITU é um índice de fácil obtenção, pois utiliza apenas os elementos climáticos  $t_{bs}$  (em °C) e UR (em %). Deste modo, a sua utilização tem sido muito apreciada por pesquisadores da área de ambiência na produção de leite, que destacam ainda a consideração da umidade relativa, elemento climático com elevada influência sobre o resfriamento de bovinos leiteiros (Almeida et al., 2011; Damasceno, 2020).

Utilizando modelos tais como o proposto por Mader et al. (2006), é possível calcular os limites de ITU que caracterizam condições de termoneutralidade e de conforto térmico com base nas faixas de  $t_{bs}$  e UR para bovinos leiteiros (Tabela 2.2).

$$ITU = 0,8 \cdot t_{bs} + UR \cdot \left( \frac{t_{bs} - 14,3}{100} \right) + 46,3 \quad (1.1)$$

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

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

Os limites de ITU caracterizados como de conforto e desconforto térmico para bovinos leiteiros em lactação não são totalmente consenso entre a comunidade científica da área. De modo geral, admite-se que tais limites podem ser considerados, de maneira satisfatória, como:  $ITU < 74$  – condição de conforto térmico;  $74 \leq ITU < 79$  – condição de alerta;  $79 \leq ITU < 84$  – condição de perigo; e  $ITU \geq 84$  – condição de emergência (Thom, 1959; Hahn, 1999; Hubbard et al., 1999; Mader et al., 2006). Como as características produtivas e reprodutivas de bovinos leiteiros são altamente dependentes do ambiente térmico, valores de ITU superiores a 72 já podem ser considerados elevados (Dash et al., 2016).

No Brasil, pesquisadores têm feito uso do ITU para avaliação do ambiente térmico de produção em sistemas *CB* localizados em diferentes regiões.

Pereira (2017) avaliou o ambiente térmico em dois sistemas *CB* abertos durante os períodos de inverno e verão, e observou que no inverno o ITU médio nas instalações manteve-se dentro da faixa considerada de conforto térmico (68), ao passo que no verão atingiu níveis caracterizados pela autora como estresse térmico (74), mantendo-se elevado durante o dia, mesmo com o uso de ventilação mecânica.

Oliveira et al. (2019a) avaliaram as condições térmicas durante o período de Primavera em sistemas *CB* abertos e com diferentes tipos de ventilação (natural, mecânico do tipo *HVLS* e mecânico do tipo *LVHS*), e observaram que os níveis mais elevados de ITU foram encontrados no sistema com ventilação natural, seguido do com ventilação mecânica do tipo *LVHS*. Apesar do sistema com ventilação mecânica do tipo *HVLS* ter apresentado melhor distribuição espacial e menores níveis de ITU, no horário mais quente do dia foram verificadas condições caracterizadas como de estresse por calor.

Damasceno et al. (2019) estudaram o ambiente térmico em um sistema *CB* totalmente fechado e climatizado via ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo. O estudo foi conduzido durante o período de Primavera, e os autores observaram que a distribuição do ITU no interior da instalação era uniforme, apesar da ocorrência de condição caracterizada como alerta em algumas regiões, observada no período tarde.

Em locais de climas tropical e subtropical, onde são registradas elevadas temperaturas na maior parte do ano, os animais gastam elevada quantidade de energia para ativação de mecanismos de dissipação de calor (Damasceno, 2020). Por este motivo, a entalpia específica do ar ( $H$ , em  $\text{kJ}\cdot\text{kg}$  de ar seco<sup>-1</sup>), que representa a quantidade de energia contida em uma mistura

de vapor d'água, é considerada adequada para avaliação do conforto térmico, uma vez que mensura a quantidade de energia presente no ar, baseando-se em suas propriedades termodinâmicas ( $t_{bs}$  e UR) (Rodrigues et al., 2011; Castro Júnior & Silva, 2021).

A H pode ser calculada por meio do modelo proposto por Rodrigues et al. (2011).

$$H = 1,006 \cdot t_{bs} + \frac{UR}{PB} \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot t_{bs}}{237,3 + t_{bs}}} \cdot (71,28 + 0,052 \cdot t_{bs}) \quad (1.2)$$

Em que:  $PB$  é a pressão barométrica local, em  $mmHg$ .

Com intuito de avaliar de forma prática o ambiente térmico em sistemas de produção de leite, os pesquisadores Mellace & Silva (2006), do Núcleo de Pesquisas em Ambiência da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), montaram tabelas práticas de entalpia para bovinos leiteiros. Também é possível calcular os limites de H característicos de condições de termoneutralidade e de conforto térmico com base nas faixas de  $t_{bs}$  e UR para bovinos leiteiros (Tabela 2.2), com base no modelo proposto por Rodrigues et al. (2011).

Guesine (2020) avaliou e caracterizou um sistema *CB* aberto, com animais em diferentes estágios de lactação, durante o período de verão. O autor fez uso do ITU e da H para caracterização do ambiente térmico, e relatou que foram registrados valores médios internos elevados (73,2 e 68,3  $\text{kJ} \cdot \text{kg}$  de ar seco<sup>-1</sup>, respectivamente), caracterizando condição de desconforto térmico no local.

Na Zona da Mata Mineira, Andrade (2021) realizou estudo em um sistema *CB* fechado e dotado de ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo, durante os períodos de inverno e verão. Para caracterização do ambiente térmico, foi utilizado o ITU e a H, e observado que a pior situação ocorreu nas tardes de verão, quando foram registrados valores médios de ITU e H iguais a 76,1 e 69,4  $\text{kJ} \cdot \text{kg}$  de ar seco<sup>-1</sup>, respectivamente, caracterizando condição de desconforto térmico, mesmo com o uso do sistema de resfriamento adiabático evaporativo (SRAE).

### 2.7.3 Uso de modelagem para avaliação das condições térmico-ambientais

Dada a importância que a avaliação do ambiente apresenta para sistemas de produção animal, o uso de métodos e ferramentas computacionais inovadores, que objetivam auxiliar na tomada de decisão e melhoria do ambiente, é cada vez mais frequente (Borges et al., 2010). Diversas metodologias e/ou ferramentas de modelagem podem ser empregados, tais como técnicas de geoestatística, aprendizado de máquinas, fluidodinâmica computacional (CFD) etc.

O uso de ferramentas de geoestatística, que possibilitam avaliar dependência e distribuição espacial e interpretar os resultados a partir da estruturação natural dos dados (Cambardella & Elliott, 1992; Medeiros et al., 2014), tem se apresentado bastante satisfatório em diversas áreas. No Brasil, tais técnicas já foram aplicadas com êxito nas áreas de fruticultura (Leal et al., 2010), fertilidade do solo e agricultura de precisão (Grego et al., 2011), climatologia (Carvalho et al., 2012), ambiência animal (Medeiros et al., 2014), entomologia (Pazini et al., 2015), entre outras.

Diversos pesquisadores brasileiros têm aplicado as técnicas de geoestatística para estudo do ambiente de produção em sistemas *CB*, avaliando do ambiente térmico a qualidade da cama.

Damasceno et al. (2019) utilizaram a geoestatística para avaliar variáveis térmicas, acústicas e iluminância em um sistema *CB* fechado e climatizado (ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo). Os autores observaram a ocorrência de dependência espacial e distribuição não uniforme ao longo do sistema avaliado, com destaque para a distribuição de variáveis térmicas, em que se observou predominância de condição de alerta ao longo da instalação.

Mota et al. (2019) utilizaram a modelagem geoestatística para identificar pontos críticos em relação ao conforto térmico em um sistema *CB* aberto localizado no Sul de Minas Gerais, e concluíram que o uso das técnicas permitiu identificar regiões caracterizadas como de desconforto térmico, durante o período de verão.

Oliveira et al. (2019a) fizeram uso das técnicas de geoestatística para avaliar as condições térmicas e ruído em sistemas *CB* abertos e com diferentes tipos de ventilação (natural, mecânico do tipo *HVLS* e mecânico do tipo *LVHS*). Por meio do estudo, os autores observaram a ocorrência de dependência e distribuição espacial não uniforme, com destaque para o sistema dotado de ventilação do tipo *HVLS*, em que foram observadas melhores condições térmicas e níveis de ruído menos elevados.

Silva et al. (2020) aplicaram as técnicas de geoestatística e de inferência exploratória para caracterizar fatores abióticos e de temperatura da cama em um sistema *CB* localizado no semiárido brasileiro, e concluíram que o uso das técnicas mencionadas permitiu estabelecer um índice de conforto para este tipo de sistema em condições semiáridas.

Andrade et al. (2021) avaliaram a distribuição espacial das variáveis da cama (temperatura, umidade e pH), na superfície e em profundidade (0,2 m), em sistema *CBP* fechado, com ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo. Os autores observaram a ocorrência de dependência espacial e distribuição não uniforme, com

piores níveis de temperatura e umidade observados em regiões próximas do corredor de alimentação, da placa de resfriamento evaporativo e em locais com maior densidade de animais.

Vieira et al. (2021) aplicaram as técnicas de geoestatística para avaliar a variabilidade espacial do ambiente térmico em um sistema *CB* aberto e com ventilação por pressão positiva, correlacionando com o comportamento de animais em diferentes estágios de lactação. Os autores observaram a ocorrência de dependência e distribuição espacial não uniforme das variáveis estudadas, com registro de elevadas temperaturas do ar na face norte, bem como umidade muito variável ao longo da instalação. Em relação ao comportamento, relatou-se a ocorrência de comportamento de dominância de vacas múltíparas sobre primíparas.

## 2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na última década, o sistema de confinamento *Compost Barn (CB)* tem recebido elevada adesão por parte dos produtores de leite brasileiros, que buscam assegurar melhorias no conforto, produtividade, sanidade e longevidade do rebanho, além da redução dos custos de implantação e produção, e maior enfoque ambiental, dado que este sistema utiliza menos água para limpeza de dejetos e forma um composto com características agronômicas desejáveis.

Desenvolvido como uma alternativa aos modelos tradicionais de confinamento de bovinos de leite (*Tie Stall* e *Free Stall*), o sistema *CB* teve início em Minnesota, nos Estados Unidos e se espalhou por todo o mundo. No Brasil, os primeiros sistemas *CB* foram construídos em 2012 no Estado de São Paulo e, a partir de então, tem-se observado crescimento expressivo no número de instalações construídas.

O conceito de funcionamento deste sistema é a introdução de métodos de compostagem das fezes e urina animais, junto com o material de cama. Estes materiais fornecem os elementos essenciais (carbono, nitrogênio, umidade e microrganismos) para o processo, que, neste caso, é definido como semi-compostagem, devido os incrementos contínuos de matéria orgânica (fezes, urina e material de cama seco) e maior área para troca de calor.

Para o bom funcionamento de sistema, deve-se escolher materiais de cama apropriados e realizar manejo adequado às características da cama. O material de cama deve ser macio e confortável aos animais, possuir disponibilidade de nutrientes para os microrganismos decompositores e ter bom custo-benefício. O manejo da cama, realizado por meio do controle da densidade de animais alojados, do revolvimento e da reposição da cama e do controle da taxa de ventilação, deve assegurar o fornecimento de superfície higiênica e confortável, bem como condições adequadas para ocorrência do processo de semi-compostagem.

De modo geral, os sistemas *CB* são projetados para que os animais fiquem totalmente confinados, sendo as instalações compostas por áreas de descanso (cama), alimentação e trato. As instalações implantadas no Brasil são majoritariamente abertas, e diversas são as recomendações de projeto, tais como orientação Leste-Oeste, elevado pé-direito, uso de materiais de telhado com maior resistência térmica etc. Alguns trabalhos de caracterização arquitetônica e tecnológica já foram realizados, mas é importante que mais trabalhos do tipo sejam desenvolvidos.

O condicionamento térmico neste tipo de sistema é realizado por meio do uso de técnicas de ventilação e resfriamento, sendo variável conforme a concepção de projeto adotada. Recorrentemente, os projetos baseiam-se em sistemas *CB* com laterais abertas, ventilação do tipo pressão positiva, com aproveitamento do efeito das correntes naturais de ar e/ou complementação por meio de ventilação mecânica, e sistemas *CB* fechados, com ventilação do tipo pressão negativa, em que volume e vazão de ar são controlados.

Neste tipo de sistema, a avaliação das condições térmico-ambientais é de elevada importância para o sucesso da atividade de produção de leite, podendo ser empregada para a identificação da necessidade de alterações no manejo e emprego de tecnologias de arrefecimento térmico adequadas. Esta avaliação pode ser realizada com base em variáveis isoladas (temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar etc.) e/ou índices de conforto térmico, fazendo uso de métodos e ferramentas computacionais inovadores, tais como técnicas de geoestatística, que apresentam elevado potencial de uso para avaliação do ambiente no interior de sistemas de produção animal.

Apreende-se que devem ser realizados estudos detalhados sobre as condições ambientais, eficiência de ventilação, materiais alternativos de cama e revolvimento da cama, e suas influências sobre conforto térmico e qualidade da cama em sistemas *CB*. Estes estudos possibilitarão melhor entendimento sobre este tipo de sistema para alojamento de bovinos de leite em produção sob condições climáticas do Brasil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACJ INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE PEÇAS E MÁQUINAS AGRÍCOLAS. **Enxada rotativa Compost Barn ERCB-2000**. Disponível em: <[https://www.acj-ind.com/\\_files/ugd/f6d53e\\_6be8176885bc4dc1830f911d4cd79657.pdf](https://www.acj-ind.com/_files/ugd/f6d53e_6be8176885bc4dc1830f911d4cd79657.pdf)>. Acesso em: 15 nov. 2021.

ALBINO, R.L.; TARABA, J.L.; MARCONDES, M.I.; ECKELKAMP, E.A.; BEWLEY, J.M. Comparison of bacterial populations in bedding material, on teat ends, and in milk of cows

housed in compost bedded pack barns. **Animal Production Science**, v.58, p.1686, 2018. DOI: 10.1071/AN16308.

ALBRIGHT, L.D. **Environment control for animals and plants**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1990. 453p.

ALMEIDA, G.L.P.; PANDORFI, H.; GUISELINI, C.; HENRIQUE, H.M.; ALMEIDA, G.A.P. Uso do sistema de resfriamento adiabático evaporativo no conforto térmico de vacas da raça girolando. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.754–760, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000700015.

ANDRADE, R.R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas compost barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Viçosa.

ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; FREITAS, L.C.S.R.; FERREIRA, C.F.S.; BARBARI, M.; BAPTISTA, F.J.F.; COELHO, D.J.R. Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, v.23, p.103111, 2021. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103111.

BAÊTA, F.C.; SOUZA, C.F. **Ambiência em edificações rurais: Conforto térmico**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 269p.

BALCELLS, J.; FUERTES, E.; SERADJ, A.R.; MAYNEGRE, J.; VILLALBA, D.; LA FUENTE, G. DE. Study of nitrogen fluxes across conventional solid floor cubicle and compost-bedded pack housing systems in dairy cattle barns located in the Mediterranean area: Effects of seasonal variation. **Journal of Dairy Science**, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-17555.

BARBERG, A.E.; ENDRES, M.I.; JANNI, K.A. Compost dairy barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.231–238, 2007a.

BARBERG, A.E.; ENDRES, M.I.; SALFER, J.A.; RENEAU, J.K. Performance and welfare of dairy cows in an alternative housing system in Minnesota. **Journal of Dairy Science**, v.90, p.1575–1583, 2007b. DOI: 10.3168/jds.S0022-0302(07)71643-0.

BERMAN, A.; FOLMAN, Y.; KAIM, M.; MAMEN, M.; HERZ, Z.; WOLFENSON, D.; ARIELI, A.; GRABER, Y. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a subtropical climate. **Journal of Dairy Science**, v.68, p.1488–1495, 1985. DOI: 10.3168/JDS.S0022-0302(85)80987-5.

BERRY, I.L.; SHANKLIN, M.D.; JOHNSON, H.D. Dairy shelter design based on milk production decline as affected by temperature and humidity. **Transactions of the ASAE**, v.7, p.329–331, 1964. DOI: 10.13031/2013.40772.

BEWLEY, J.; TARABA, J.; DAY, G.; BLACK, R.; DAMASCENO, F. Compost Bedded Pack Barn Design: Features and management considerations. **University of Kentucky Cooperative Extension Service**, p.21, 2012.

BEWLEY, J.M.; ROBERTSON, L.M.; ECKELKAMP, E.A. A 100-Year Review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, v.100, p.10418–10431, 2017. DOI: 10.3168/jds.2017-13251.

- BIASATO, I.; D'ANGELO, A.; BERTONE, I.; ODORE, R.; BELLINO, C. Compost bedded-pack barn as an alternative housing system for dairy cattle in Italy: effects on animal health and welfare and milk and milk product quality. **Italian Journal of Animal Science**, v.18, p.1142–1153, 2019. DOI: 10.1080/1828051X.2019.1623095.
- BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; BEWLEY, J.M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v.96, p.8060–8074, 2013. DOI: 10.3168/jds.2013-6778.
- BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; NEWMAN, M.C.; AKERS, K.A.; WOOD, C.L.; MCQUERRY, K.J.; BEWLEY, J.M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, v.97, p.2669–2679, 2014. DOI: 10.3168/jds.2013-6779.
- BORGES, G.; MIRANDA, K.O. DA S.; RODRIGUES, V.C.; RISI, N. Uso da geoestatística para avaliar a captação automática dos níveis de pressão sonora em instalações de creche para suínos. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.377–385, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000300002.
- BORSHCH, A.A.; RUBAN, S.; BORSHCH, A. V; BABENKO, O. Effect of three bedding materials on the microclimate conditions, cows behavior and milk yield. **Polish Journal of Natural Sciences**, v.34, p.19–31, 2019.
- BORSHCH, O.O.; BORSHCH, O. V; KOSIOR, L.T.; PIROVA, L. V; LASTOVSKA, I.O. Influence of various litter materials and premises characteristics on the comfort and behavior of cows. **Ukrainian Journal of Ecology**, v.7, p.529–535, 2017. DOI: 10.15421/2017\_156.
- BUCKLIN, R.A.; TURNER, L.W.; BEEDE, D.K.; BRAY, D.R.; HEMKEN, R.W. Methods to relieve heat stress for dairy cows in hot, humid climates. **Applied Engineering in Agriculture**, v.7, p.241–247, 1991. DOI: 10.13031/2013.26218.
- BUDZIAK, C.R.; MAIA, C.M.B.F.; MANGRICH, A.S. Transformações químicas da matéria orgânica durante a compostagem de resíduos da indústria madeireira. **Química Nova**, v.27, p.399–403, 2004. DOI: 10.1590/S0100-40422004000300007.
- BURGSTALLER, J.; RATH, J.; KUCHLING, S.; MANDL, V.; HUND, A.; KOFLER, J. Claw health and prevalence of lameness in cows from compost bedded and cubicle freestall dairy barns in Austria. **The Veterinary Journal**, v.216, p.81–86, 2016. DOI: 10.1016/j.tvjl.2016.07.006.
- CALDATO, E.M.R.; CALDATO, A.; MARCONDES, M.I.; ROTTA, P.P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35p.
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777–783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.
- CARVALHO, J.R.P. DE; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Interpoladores geoestatísticos na análise da distribuição espacial da precipitação anual e de sua relação com altitude. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.1235–1242, 2012. DOI: 10.1590/S0100-204X2012000900008.

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, p.149–161, 2021. DOI: 10.1007/s00484-020-02022-8.

CORTEZ, L.A.B.; MAGALHÃES, P.S.G. **Introdução à Engenharia Agrícola**. 1.ed. Campinas: Unicamp, 1993. 393p.

COTTA, J.A.O.; CARVALHO, N.L.C.; BRUM, T.S.; REZENDE, M.O.O. Compostagem versus vermicompostagem: Comparação das técnicas utilizando resíduos vegetais, esterco bovino e serragem. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v.20, p.65–78, 2015. DOI: 10.1590/S1413-41522015020000111864.

CURTIS, S.E. Environmental management in animal agriculture. **Tropical Animal Health and Production**, p.409, 1983. DOI: 10.1007/BF02355874.

DALCIN, V.C.; FISCHER, V.; DALTRO, D.S.; ALFONZO, E.P.M.; STUMPF, M.T.; KOLLING, G.J.; SILVA, M.V.G.B. DA; MCMANUS, C. Physiological parameters for thermal stress in dairy cattle. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.45, p.458–465, 2016. DOI: 10.1590/S1806-92902016000800006.

DAMASCENO, F.A. **Compost Barn como uma alternativa para a pecuária leiteira**. 1.ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396p.

DAMASCENO, F.A.; OLIVEIRA, C.E.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; BARBARI, M.; FERRAZ, P.F.P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v.17, p.385–395, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.115.

DAMASCENO, F.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; A. O. VEGA, F.; S. O. ROCHA, K.; BLACK, R.A.; BEWLEY, J.M.; E. A. OLIVEIRA, C.; BARBARI, M. 3D CFD Analysis of Natural Ventilation in Reduced Scale Model of Compost Bedded Pack Barn for Dairy Cows. **Applied Sciences**, v.10, p.8112, 2020. DOI: 10.3390/app10228112.

DASH, S.; CHAKRAVARTY, A.K.; SINGH, A.; UPADHYAY, A.; SINGH, M.; YOUSUF, S. Effect of heat stress on reproductive performances of dairy cattle and buffaloes: A review. **Veterinary World**, v.9, p.235–244, 2016. DOI: 10.14202/vetworld.2016.235-244.

ECKELKAMP, E.A.; TARABA, J.L.; AKERS, K.A.; HARMON, R.J.; BEWLEY, J.M. Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, v.190, p.35–42, 2016. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.05.017.

FARENZENA EQUIPAMENTOS. **Misturador de Compost Barn**. Disponível em: <<https://www.farenzena.com.br/solucoes-detalhes/31/misturador-de-compost-barn>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

FÁVERO, S.; PORTILHO, F.V.R.; OLIVEIRA, A.C.R.; LANGONI, H.; PANTOJA, J.C.F. Longitudinal trends and associations between Compost bedding characteristics and bedding bacterial concentrations. **Journal of Agricultural Science**, v.7, p.58–85, 2015. DOI: 10.5539/jas.v7n10p58.

- FERRAZ, P.F.P.; FERRAZ, G.A. E S.; LESO, L.; KLOPČIČ, M.; BARBARI, M.; ROSSI, G. Properties of conventional and alternative bedding materials for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.8661–8674, 2020. DOI: 10.3168/jds.2020-18318.
- GALAMA, P. **On farm development of bedded pack dairy barns in The Netherlands**. 1.ed. Lelystad: Wageningen UR Livestock Research, 2014. 22p.
- GALAMA, P.J.; OUWELTJES, W.; ENDRES, M.I.; SPRECHER, J.R.; LESO, L.; KUIPERS, A.; KLOPČIČ, M. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.5759–5772, 2020. DOI: 10.3168/JDS.2019-17214.
- GHIELMETTI, G.; CORTI, S.; FRIEDEL, U.; HÜBSCHKE, E.; FEUSI, C.; STEPHAN, R. Mastitis associated with Mycobacterium smegmatis complex members in a Swiss dairy cattle herd: Compost bedding material as a possible risk factor. **Schweizer Archiv für Tierheilkunde**, v.159, p.668–672, 2017. DOI: 10.17236/sat00140.
- GREGO, C.R.; COELHO, R.M.; VIEIRA, S.R. Critérios morfológicos e taxonômicos de Latossolo e Nitossolo validados por propriedades físicas mensuráveis analisadas em parte pela geoestatística. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.337–350, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000200005.
- GUERRA-GALDO, E.H.; SANZ, S.C.; BARBER, F.E.; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P.A. CFD model for ventilation assessment in poultry houses with different distribution of windows. **International Journal of Energy and Environment**, v.6, p.411–424, 2015.
- GUESINE, G.D. **Sistema compost barn para bovinos leiteiros e seus reflexos nos parâmetros ambientais, desempenho e produção durante o verão em diferentes fases da lactação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Piracicaba.
- HAHN, G.L. Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. **Journal of Animal Science**, v.77, p.10–20, 1999. DOI: 10.2527/1997.77SUPPL\_210X.
- HANAJIMA, D.; KURODA, K.; MORISHITA, K.; FUJITA, J.; MAEDA, K.; MORIOKA, R. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting. **Bioresource Technology**, v.101, p.2306–2310, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.026.
- HARAMAQ INDÚSTRIA DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS. **Revolvedor de cama STIR-2000**. Disponível em: <<https://haramaq.com.br/wp-content/uploads/2021/06/Stir-HaramaQ.pdf>>. Acesso em: 13 nov. 2021.
- HASSEN, A.; BELGUITH, K.; JEDIDI, N.; CHERIF, A.; CHERIF, M.; BOUDABOUS, A. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. **Bioresource Technology**, v.80, p.217–225, 2001. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00065-7.
- HUBBARD, K.G.; STOOKSBURY, D.E.; HAHN, G.L.; MADER, T.L. A climatological perspective on feedlot cattle performance and mortality related to the temperature-humidity index. **Journal of Production Agriculture**, v.12, p.650–653, 1999. DOI: 10.2134/jpa1999.0650.

IGONO, M.O.; BJOTVEDT, G.; SANFORD-CRANE, H.T. Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate. **International Journal of Biometeorology**, v.36, p.77–87, 1992. DOI: 10.1007/BF01208917.

JANNI, K.A.; ENDRES, M.I.; RENEAU, J.K.; SCHOPER, W.W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.97–102, 2007. DOI: 10.13031/2013.22333.

KADER, N. EL; ROBIN, P.; PAILLAT, J.; LETERME, P. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. **Bioresource Technology**, v.98, p.2619–2628, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.035.

KAPPES, R.; KNOB, D.A.; THALER, A.; ALESSIO, D.R.M.; RODRIGUES, W.B.; SCHOLZ, A.M.; BONOTTO, R. Cow's functional traits and physiological status and their relation with milk yield and milk quality in a compost bedded pack barn system. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.49, p.1–13, 2020. DOI: 10.37496/rbz4920190213.

KIM, E.; LEE, S.; JO, H.; JEONG, J.; MULBRY, W.; RHAMAN, S.; AHN, H. Solid-state anaerobic digestion of dairy manure from a sawdust-bedded pack barn: Moisture responses. **Energies**, v.11, p.484, 2018. DOI: 10.3390/en11030484.

KLAAS, I.C.; BJERG, B.S.; FRIEDMANN, S.; BAR, D. Cultivated barns for dairy cows - An option to promote cattle welfare and environmental protection in Denmark? **Dansk Veterinaertidsskrift**, v.93, p.20–29, 2010.

LAZZARINI, B.; BAUDRACCO, J.; TUÑÓN, G.; GASTALDI, L.; LYONS, N.; QUATTROCHI, H.; LOPEZ-VILLALOBOS, N. Review: Milk production from dairy cows in Argentina: Current state and perspectives for the future. **Applied Animal Science**, v.35, p.426–432, 2019. DOI: 10.15232/aas.2019-01842.

LEAL, R.M.; BARBOSA, J.C.; COSTA, M.G.; BELASQUE JUNIOR, J.; YAMAMOTO, P.T.; DRAGONE, J. Distribuição espacial de Huanglongbing (Greening) em citros utilizando a geoestatística. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.32, p.808–818, 2010. DOI: 10.1590/S0100-29452010005000077.

LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M.A.; DAMASCENO, F.A.; GALAMA, P.; TARABA, J.L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LESO, L.; CONTI, L.; ROSSI, G.; BARBARI, M. Criteria of design for deconstruction applied to dairy cows housing: A case study in Italy. **Agronomy Research**, v.16, p.794–805, 2018. DOI: 10.15159/AR.18.085.

LESO, L.; PELLEGRINI, P.; BARBARI, M. Effect of two housing systems on performance and longevity of dairy cows in Northern Italy. **Agronomy Research**, v.17, p.574–581, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.107.

LESO, L.; UBERTI, M.; MORSHED, W.; BARBARI, M. A survey of Italian compost dairy barns. **Journal of Agricultural Engineering**, v.44, p.120–124, 2013. DOI: 10.4081/jae.2013.e17.

LOBECK, K.M.; ENDRES, M.I.; SHANE, E.M.; GODDEN, S.M.; FETROW, J. Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, v.94, p.5469–5479, 2011. DOI: 10.3168/jds.2011-4363.

LOVARELLI, D.; FINZI, A.; MATTACHINI, G.; RIVA, E. A survey of dairy cattle behavior in different barns in Northern Italy. **Animals**, v.10, p.713, 2020. DOI: 10.3390/ani10040713.

LUKIANANTCHUKI, M.A.; SHIMOMURA, A.R.P.; SILVA, F.M. DA; CARAM, R.M. Sheds extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído**, v.16, p.83–104, 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000100062.

LUMA IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS LTDA. **Enxada rotativa para Compost Barn ROTOPEC-2000**. Disponível em: <[https://www.lumaimplementos.com.br/wp-content/downloads/catalogos/Catalogo\\_Rotopec\\_2000\\_Luma.pdf](https://www.lumaimplementos.com.br/wp-content/downloads/catalogos/Catalogo_Rotopec_2000_Luma.pdf)>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MADER, T.L.; DAVIS, M.S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v.84, p.712–719, 2006. DOI: 10.2527/2006.843712X.

MALHEIROS, C.S.; KONRAD, P.A. Implantação e manejo do sistema de Compost Barn para vacas leiteiras. **Ciência e Tecnologia**, v.3, p.66–73, 2019.

MEC-RUL MÁQUINAS E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Enxada rotativa Compost Barn ERP-175/200/225/250/275 BVRCG**. Disponível em: <<https://www.mec-rul.com.br/produtos/enxada-rotativa/enxada-rotativa-cama-de-gado-172>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MEDEIROS, B.B.L.; MOURA, D.J. DE; MASSARI, J.M.; CURI, T.M.R. DE C.; MAIA, A.P.D.A. Uso da geoestatística na avaliação de variáveis ambientais em galpão de suínos criados em sistema “wean to finish” na fase de terminação. **Engenharia Agrícola**, v.34, p.800–811, 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000500001.

MEE, J.; BOYLE, L. Assessing whether dairy cow welfare is “better” in pasture-based than in confinement-based management systems. **New Zealand Veterinary Journal**, v.68, p.168–177, 2020. DOI: 10.1080/00480169.2020.1721034.

MELLACE, E.M.; SILVA, I.J.O. **Tabelas de entalpia para bovinos de leite**. Disponível em: <<http://www.nupea.esalq.usp.br/tabelas-de-entalpia>>. Acesso em: 29 nov. 2021.

MENCONI, M.E.; GROHMANN, D. Model integrated of life-cycle costing and dynamic thermal simulation (MILD) to evaluate roof insulation materials for existing livestock buildings. **Energy and Buildings**, v.81, p.48–58, 2014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.06.005.

MEPEL MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Misturador de cama Avassalador MC 2000 Plus**. Disponível em: <<https://mepel.ind.br/wp-content/uploads/2020/06/misturador-cama-compost-barn-avassalador.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

MORAIS, J.M. DA S.C.; LABAKI, L.C. CFD como ferramenta para simular ventilação natural interna por ação dos ventos: estudos de caso em tipologias verticais do “Programa Minha Casa,

Minha Vida.” **Ambiente Construído**, v.17, p.223–244, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000100133.

MOTA, V.C.; ANDRADE, E.T.; LEITE, D.F. Caracterização da variabilidade espacial dos índices de conforto animal em sistemas de confinamento Compost Barn. **PUBVET**, v.13, p.170-, 2019a. DOI: 10.31533/pubvet.v13n3a276.1-14.

MOTA, V.C.; ANDRADE, E.T.; LEITE, D.F. Bed temperature in compost barns turned with rotary hoe and offset disc harrow. **Engenharia Agrícola**, v.39, p.280–287, 2019b. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n3p280-287/2019.

MOTA, V.C.; CAMPOS, A.T.; DAMASCENO, F.A.; RESENDE, E.A.M.; REZENDE, C.P.A.; ABREU, L.R.; VAREIRO, T. Confinamento para bovinos leiteiros: histórico e características. **Pubvet**, v.11, p.433–442, 2017. DOI: 10.22256/pubvet.v11n5.433-442.

MOTTA, R.G.; MARTINS, L.S.A.; MEDEIROS, G.S.; JUNIOR, V.C. Prevalence of ovarian cysts in production high cows under containment system and diet total. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v.18, p.519–525, 2019. DOI: 10.5965/223811711832019519.

NÄÄS, I. DE A.; ARCARO JÚNIOR, I. Influência de ventilação e aspersão em sistemas de sombreamento artificial para vacas em lactação em condições de calor. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, p.139–142, 2001. DOI: 10.1590/S1415-43662001000100026.

NÄÄS, I.A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 1989. 183p.

NASCIMENTO, G.R. DO; NÄÄS, I.A.; BARACHO, M.S.; PEREIRA, D.F.; NEVES, D.P. Termografia infravermelho na estimativa de conforto térmico de frangos de corte. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.658–663, 2014. DOI: 10.1590/s1415-43662014000600014.

NORTON, T.; SUN, D.-W.; GRANT, J.; FALLON, R.; DODD, V. Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review. **Bioresource Technology**, v.98, p.2386–2414, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.11.025.

OFNER-SCHRÖCK, E.; ZÄHNER, M.; HUBER, G.; GULDIMANN, K.; GUGGENBERGER, T.; GASTEINER, J. Compost barns for dairy cows - Aspects of animal welfare. **Open Journal of Animal Sciences**, v.05, p.124–131, 2015. DOI: 10.4236/ojas.2015.52015.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; VEGA, F.A.O.; TITÔCO, I.F.F.; ANDRADE, R.R. Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, p.20200384, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120200384.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, P.F.P.; NASCIMENTO, J.A.C.; FERRAZ, G.A.S.; BARBARI, M. Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, v.17, p.783–796, 2019a. DOI: 10.15159/AR.19.116.

OLIVEIRA, E.C.A.; SARTORI, R.H.; GARCEZ, T.B. **Compostagem**. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem\\_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf)>. Acesso em: 10 dez. 2021.

OLIVEIRA, V.C.; DAMASCENO, F.A.; OLIVEIRA, C.E.A.; FERRAZ, P.F.P.; FERRAZ, G.A.S.; SARAZ, J.A.O. Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: Architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, v.17, p.2016–2028, 2019b. DOI: 10.15159/AR.19.179.

PASSETTI, R.A.C.; EIRAS, C.E.; GOMES, L.C.; SANTOS, J.F.; PRADO, I.N. Intensive dairy farming systems from Holland and Brazil: SWOT analyse comparison. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.38, p.439–446, 2016. DOI: 10.4025/actascianimsci.v38i4.31467.

PAZINI, J.B.; BOTTA, R.A.; SEIDEL, E.J.; SILVA, F.F.; MARTINS, J.F.S.; BARRIGOSI, J.A.F.; RÜBENICH, R. Geostatistics applied to the study of the spatial distribution of *Tibraca limbativentris* in flooded rice fields. **Ciência Rural**, v.45, p.1006–1012, 2015. DOI: 10.1590/0103-8478cr20140841.

PEDROSA, T.D.; FARIAS, C.A.; PEREIRA, R.A.; FARIAS, E.T.R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v.1, p.44–48, 2013. DOI: 10.31413/NATIVA.V1I1.1335.

PEIXOTO, M.S.M.; BARBOSA FILHO, J.A.D.; FARIAS MACHADO, N.A.; VIANA, V.D.S.S.; COSTA, J.F.M. Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, p.1–10, 2019. DOI: 10.1080/09291016.2019.1616904.

PEREIRA, M.R. **Avaliação do comportamento e do bem-estar de vacas criadas em sistema compost barn em condições tropicais**. 2017. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências Veterinárias) - Lavras.

PEREIRA NETO, J.T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 81p.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.1, p.117–126, 2007. DOI: 10.18011/bioeng2007v1n2p117-126.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J.; CRUZ, V.F.; SOUZA, S.R.L.; LIMA, K.A.O.; MENDES, A.S. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciência Rural**, v.39, p.1492–1498, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000094.

PETZEN, J.; WOLFANGER, C.; BONHOTAL, J.; SCHWARZ, M.; TERRY, T.; YOUNGERS, N. **Case study: Eagleview compost dairy barn Cornell Cooperative Extension of Wyoming County** New York, 2009. Disponível em: <<https://ecommons.cornell.edu/bitstream/handle/1813/44658/Eagleview.pdf?sequence=2&isAllowed=y>>. Acesso em: 13 dez. 2021

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.5, p.97–105, 2017. DOI: 10.31893/2318-1265jabb.v5n3p97-105.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C.; RANKRAPE, F.; VISMARA, E.S. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, v.13, p.399–406, 2019. DOI: 10.1017/S1751731118001088.

PINHEIRO, A.C.; SARAIVA, E.P.; SARAIVA, C.A.S.; FONSECA, V. DE F.C.; ALMEIDA, M.E.V.; SANTOS, S.G.G.C.; AMORIM, M.L.C.M.; RODRIGUES NETO, P.J. Características anatomofisiológicas de adaptação de bovinos leiteiros ao ambiente tropical. **Agropecuária Técnica**, v.36, p.280–293, 2015. DOI: 10.25066/agrotec.v36i1.22280.

RADAVELLI, W.M.; DANIELI, B.; ZOTTI, M.L.A.N.; GOMES, F.J.; ENDRES, M.I.; SCHOGOR, A.L.B. Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, v.9, p.1–22, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5198.

RENAUDEAU, D.; COLLIN, A.; YAHAV, S.; BASILIO, V. DE; GOURDINE, J.L.; COLLIER, R.J. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. **Animal**, v.6, p.707–728, 2012. DOI: 10.1017/S1751731111002448.

RODRIGUES, M.S.; SILVA, F.C.; BARREIRA, L.P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C.A.; RIBEIRO, W.C. (Ed.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. 1.ed. Botucatu: FEPAF, 2006. p.63–94.

RODRIGUES, V.C.; SILVA, I.J.O.; VIEIRA, F.M.C.; NASCIMENTO, S.T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v.55, p.455–459, 2011. DOI: 10.1007/s00484-010-0344-y.

ROENFELDT, S. You can't afford to ignore heat stress. **Dairy Herd Management**, v.35, p.6–12, 1998.

RUSSELLE, M.; BLANCHET, K.; EVERETT, L. Characteristics and fertilizer value of compost dairy barn manure. In: PROCEEDINGS OF THE NATIONAL COMPOST DAIRY BARN CONFERENCE 2007, Burnsville. **Anais**. Burnsville: USDA, 2007. Disponível em: <<https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=211554>>. Acesso em: 14 dez. 2021

SAISHU, N.; MORIMOTO, K.; YAMASATO, H.; OZAKI, H.; MURASE, T. Characterization of *Aerococcus viridans* isolated from milk samples from cows with mastitis and manure samples. **Journal of Veterinary Medical Science**, v.77, p.1037–1042, 2015. DOI: 10.1292/jvms.15-0100.

SAMPAIO, C.A.P.; CRISTANI, J.; DUBIELA, J.A.; BOFF, C.E.; OLIVEIRA, M.A. Avaliação do ambiente térmico em instalação para crescimento e terminação de suínos utilizando os índices de conforto térmico nas condições tropicais. **Ciência Rural**, v.34, p.785–790, 2004. DOI: 10.1590/S0103-84782004000300020.

SCHEMAQ INDUSTRIA DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. **Escarificador de cama SME-2000**. Disponível em: <<https://www.schemaq.com.br/compost-barn/>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

- SHANE, E.M.; ENDRES, M.I.; JANNI, K.A. Alternative bedding materials for compost bedded pack barns in Minnesota: A descriptive study. **Applied Engineering in Agriculture**, v.26, p.465–473, 2010.
- SHARMA, V.K.; CANDITELLI, M.; FORTUNA, F.; CORNACCHIA, G. Processing of urban and agro-industrial residues by aerobic composting: Review. **Energy Conversion and Management**, v.38, p.453–478, 1997. DOI: 10.1016/S0196-8904(96)00068-4.
- SILANO, C.; SANTOS, M. V. Você sabe o que é um Compost Barn? **Revista Leite Integral**, v.46, p.40–43, 2012.
- SILVA, M.V.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G.L.P.; JARDIM, A.M.R.F.; BATISTA, P.H.D.; SILVA, R.A.B.; LOPES, I.; OLIVEIRA, M.E.G.; SILVA, J.L.B.; MORAES, A.S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v.94, p.102782, 2020. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2020.102782.
- SINGH, A.; KUMARI, T.; RAJPUT, M.; BAISHYA, A.; BHATT, N.; ROY, S. Review on effect of bedding material on production, reproduction and health of dairy animals. **International Journal of Livestock Research**, p.1, 2020. DOI: 10.5455/ijlr.20200207073618.
- SOUZA, C.F.; TINÔCO, I.F.F.; BAÊTA, F.C.; SARTOR, V.; PAULA, M.O. **Unidades para produção animal – UPAs: Planejamento e projeto**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2021. 125p.
- SOUZA, P. Avicultura e clima quente: Como administrar o bem-estar às aves? **Avicultura Industrial**, v.3, p.1–6, 2005.
- SR IMPLEMENTOS. **Enxada rotativa Compost Barn SER-2000/2500 CB**. Disponível em: <[https://www.srimplementos.com/upload/prospecto/prospecto\\_10\\_20210601102700\\_1622554020.pdf](https://www.srimplementos.com/upload/prospecto/prospecto_10_20210601102700_1622554020.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2021.
- STENTIFORD, E.I. Composting control: principles and practice. In: BERTOLDI, M. DE; SEQUI, P.; LEMMES, B.; PAPI, T. (Ed.). **The Science of Composting**. 1.ed. Dordrecht: Springer, 1996. p.49–59. DOI: 10.1007/978-94-009-1569-5\_6.
- THOM, E.C. The discomfort index. **Weatherwise**, v.12, p.57–61, 1959. DOI: 10.1080/00431672.1959.9926960.
- TINÔCO, I.F.F. Avicultura industrial: Novos conceitos de materiais, concepções e técnicas construtivas disponíveis para galpões avícolas brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência Avícola**, v.3, p.1–26, 2001. DOI: 10.1590/s1516-635x2001000100001.
- VALENTE, B.S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T.B.G.A.; JAHNKE, D.S.; BRUM JR., B.; CABRERA, B.R.; MORAES, P.; LOPES, D.C.N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v.58, p.59–85, 2009. DOI: 10.21071/az.v58i224.5074.
- VALENTE, D.A.; SOUZA, C.F.; ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; SOUSA, F.C.; ROSSI, G. Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, v.18, p.1547–1555, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.103.
- VASCONCELOS, J.L.M.; DEMÉTRIO, D.G.B. Manejo reprodutivo de vacas sob estresse calórico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, p.396–401, 2011.

VIEIRA, F.M.C.; SOARES, A.A.; HERBUT, P.; VISMARA, E.S.; GODYŃ, D.; SANTOS, A.C.Z. DOS; LAMBERTES, T.S.; CAETANO, W.F. Spatio-thermal variability and behaviour as bio-thermal indicators of heat stress in dairy cows in a Compost Barn: A case study. **Animals**, v.11, p.1197, 2021. DOI: 10.3390/ani11051197.

VILELA, M.O.; GATES, R.S.; SOUZA, C.F.; MARTINS, M.A.; TINÔCO, I.F.F.; TELES JÚNIOR, C.G.S. Sistemas de ventilação na avicultura brasileira: Estado da arte. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.14, p.152, 2020. DOI: 10.18011/bioeng2020v14n2p152-171.

VIMAQ MÁQUINAS AGRÍCOLAS LTDA. **Revolvedor de Compost Barn Vimaq**. Disponível em: <<https://vimaqmaquinas.com.br/portfolio-item/revolvedor-de-compost-barn/>>. Acesso em: 14 nov. 2021.

WAGNER, P.E. Bedded pack shelters. **Lancaster Farming**, v.47, p.36, 2002.

WEBER, C.T.; SCHNEIDER, C.L.C.; BUSANELLO, M.; CALGARO, J.L.B.; FIORESI, J.; GEHRKE, C.R.; CONCEIÇÃO, J.; HAYGERT-VELHO, I.M.P. Season effects on the composition of milk produced by a Holstein herd managed under semi-confinement followed by compost bedded dairy barn management. **Semina: Ciências Agrárias**, v.42, p.1667–1678, 2020. DOI: 10.5433/1679-0359.2020v41n5p1667.

WEST, J.W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.86, p.2131–2144, 2003. DOI: 10.3168/JDS.S0022-0302(03)73803-X.

YAMEOGO, B.; ANDRADE, R.R.; TELES JÚNIOR, C.G.S.; LAUD, G.S.; BECCIOLINI, V.; LESO, L.; ROSSI, G.; BARBARI, M. Analysis of environmental conditions and management in a compost-bedded pack barn with tunnel ventilation. **Agronomy Research**, v.19, p.1195–1204, 2021. DOI: 10.15159/AR.21.035.

### 3 CAPÍTULO II

#### DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DO MICROAMBIENTE TÉRMICO EM SISTEMA *COMPOST BARN* ABERTO SEMICLIMATIZADO VIA VENTILAÇÃO POR PRESSÃO POSITIVA

**RESUMO:** Objetivou-se com este estudo avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial e temporal de variáveis e índices do ambiente térmico no interior de um sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva (*CBAVP*), durante o período de inverno. O estudo foi conduzido em uma instalação para bovinos leiteiros em produção, em sistema *CBAVP* localizado na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. O interior da instalação foi dividido em uma malha composta por 55 pontos equidistantes, onde foram coletados continuamente dados de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e umidade relativa do ar (UR), a cada 5 minutos, durante todo o período experimental (três semanas). Os dados coletados foram divididos em quatro diferentes períodos diários: madrugada (00h00min às 05h59min), manhã (06h00min às 11h59min), tarde (12h00min às 17h59min) e noite (18h00min às 23h59min), a partir dos quais foram calculados os valores médios. Para avaliação do microambiente térmico, foram utilizados o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e a Entalpia Específica do Ar (H) e, para análise da dependência espacial, foram aplicadas técnicas de geoestatística. Com base nos resultados, observou-se que a  $t_{bs}$  média manteve-se dentro da zona de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação (ZCT) durante todo o período de estudo, apesar da  $t_{bs}$  absoluta atingir valores fora da ZCT em alguns horários da tarde, na maioria dos dias. Verificou-se também que a UR média esteve acima da ZCT na maioria dos dias, nos horários das 00h00min às 10h00min e das 17h00min às 24h00min. Porém, por meio do ITU e da H, a combinação destes dois fatores indicou ocorrência de condições de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação, em todos os horários avaliados. A aplicação das técnicas de geoestatística permitiu verificar a ocorrência de forte dependência espacial para todas as variáveis e índices avaliados. Através dos mapas de distribuição espacial, observou-se que  $t_{bs}$  e UR apresentaram distribuição variável ao longo da instalação, notadamente nos períodos manhã e tarde. Porém, por meio dos mapas de ITU e H verificou-se ocorrência de condições características de conforto térmico para bovinos leiteiros. Os valores mais elevados de  $t_{bs}$ , ITU e H foram registrados no período tarde, na região Noroeste da instalação ( $t_{bs} = 23,2$  °C, ITU = 69,7 e H = 50,9 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), que recebia incidência de radiação solar direta. Os valores mais baixos ocorreram no período madrugada, em região próxima dos ventiladores ( $t_{bs} = 10,0$  °C, ITU = 50,0 e H = 29,8 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>).

**Palavras-chave:** bovinos de leite, sistemas de confinamento, conforto térmico, acondicionamento térmico, geoestatística

**SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF THE THERMAL  
MICROENVIRONMENT IN OPEN SEMI-CLIMATIZED COMPOST BARN  
SYSTEM BY POSITIVE PRESSURE VENTILATION**

**ABSTRACT:** The objective of this study was to evaluate and characterize spatial and temporal dependence and distribution of variables and indexes of the thermal environment inside an open semi-climate Compost Barn system by positive pressure ventilation (CBAVP), during the winter period. The study was conducted in a facility for dairy cattle in production, in a CBAVP system located in the Zona da Mata region, Minas Gerais, Brazil. The interior of the facility was divided into a mesh made up of 55 equidistant points, where data on dry air bulb temperature ( $t_{bs}$ ) and relative humidity (UR) were continuously collected every 5 minutes throughout the experimental period (three weeks). The data collected were divided into four different daily periods: dawn (00h00min to 05h59min), morning (06h00min to 11h59min), afternoon (12h00min to 17h59min) and night (18h00min to 23h59min), from which the average values were calculated. To evaluate the thermal microenvironment, the Temperature and Humidity Index (ITU) and the Specific Enthalpy of Air (H) were used and, for the analysis of spatial dependence, geostatistical techniques were applied. Based on the results, it was observed that the mean  $t_{bs}$  remained within the thermal comfort zone for lactating dairy cattle (ZCT) throughout the study period, despite the absolute  $t_{bs}$  reaching values outside the ZCT at some times in the afternoon, most of the days. It was also found that the average UR was above the ZCT on most days, from 00h00min to 10h00min and from 17h00min to 24h00min. However, through the ITU and H, the combination of these two factors indicated the occurrence of thermal comfort conditions for lactating dairy cattle, at all times evaluated. The application of geostatistical techniques allowed verifying the occurrence of strong spatial dependence for all variables and indexes evaluated. Through the spatial distribution maps, it was observed that  $t_{bs}$  and UR presented variable distribution throughout the installation, notably in the morning and afternoon periods. However, through the ITU and H maps, the occurrence of characteristic conditions of thermal comfort for dairy cattle was verified. The highest values of  $t_{bs}$ , ITU and H were recorded in the afternoon period, in the Northwest region of the installation ( $t_{bs} = 23.2$  °C, ITU = 69.7 and H = 50.9 kJ·kg of dry air<sup>-1</sup>), which received direct solar radiation. The lowest values occurred at dawn, in a region close to the fans ( $t_{bs} = 10.0$  °C, ITU = 50.0 and H = 29.8 kJ·kg of dry air<sup>-1</sup>).

**Keywords:** dairy cattle, confinement systems, thermal comfort, thermal conditioning, geostatistics

### 3.1 INTRODUÇÃO

Na produção de bovinos de leite, o uso de sistemas de confinamento é uma das principais estratégias utilizadas quando se busca melhorar o ambiente térmico (Perissinotto & Moura, 2007; Damasceno, 2020). Sua principal vantagem é possibilitar o controle das condições ambientais e, conseqüentemente, assegurar ambiente adequado para que os animais expressem seu máximo potencial produtivo (Passetti et al., 2016; Mee & Boyle, 2020).

Nas últimas décadas, tem-se observado tendência à utilização de sistemas de confinamento em instalações livres de baias, que, além de assegurar condições adequadas de conforto térmico, possibilitam maior liberdade de movimentação e interação entre os animais, e redução das emissões de gases de efeito estufa (Galama et al., 2020). Na bovinocultura de leite brasileira, tem-se observado elevado crescimento na adoção de projetos do sistema de confinamento conhecido como *Compost Barn (CB)*. Tal sistema possibilita assegurar melhorias no conforto, produtividade, sanidade e longevidade do rebanho, e tem menor custo de implantação e maior enfoque ambiental, dado que utiliza menos água para limpeza de dejetos e forma um composto com características agronômicas desejáveis (Bewley et al., 2017; Leso et al., 2019; Damasceno, 2020).

Os primeiros sistemas *CB* construídos no Brasil foram projetados de acordo com o modelo norte-americano, idealizado para condições de climas temperados (Leso et al., 2020). Porém, dadas as condições de climas tropical e subtropical presentes no território brasileiro, tem-se optado pela utilização destas instalações com laterais abertas. Neste caso, inicialmente explora-se a ventilação natural. Todavia, em locais onde a taxa de ventilação natural é baixa ou as condições de temperatura e umidade relativa do ar são extremas, faz-se necessário utilizar sistemas mecânicos de ventilação, associados ou não ao resfriamento adiabático evaporativo (Pilatti & Vieira, 2017; Leso et al., 2018; Damasceno et al., 2019; Andrade et al., 2021).

Evidentemente, o uso de sistemas mecânicos de ventilação possibilita melhores condições internas de temperatura ( $t_{bs}$ ), umidade relativa (UR) e velocidade do ar ( $v_{ar}$ ), fatores do ambiente com maior influência sobre o bem-estar e o desempenho de bovinos de leite (Damasceno et al., 2019). Porém, os sistemas de ventilação utilizados em instalações *CB* no Brasil precisam ser avaliados e caracterizados detalhadamente, para que sejam realizados os ajustes necessários nos projetos de novas instalações e/ou no manejo dos sistemas já existentes (Sales et al., 2011).

Em qualquer sistema de produção animal, a realização de estudos de avaliação e caracterização do ambiente é importante, pois possibilita identificar eventuais falhas existentes, propor soluções e levantar informações detalhadas para os produtores (Faria et al., 2008). Esta avaliação pode ser realizada por meio de elementos climáticos, tais como  $t_{bs}$  e UR, que permitem realizar um diagnóstico generalizado. Todavia, o uso de Índices de Conforto Térmico (ICTs) possibilita a obtenção de informações mais representativas, uma vez que considera o efeito combinado destes elementos (Perissinotto et al., 2009; Baêta & Souza, 2010).

Por ser de fácil obtenção, pois necessita apenas  $t_{bs}$  e UR, o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) tem sido amplamente utilizado para avaliação do ambiente térmico em sistemas de produção de leite (Damasceno, 2020). Outro índice muito utilizado para avaliação do ambiente térmico neste tipo de sistema é a Entalpia Específica do Ar (H, em  $k \cdot kg$  de ar seco<sup>-1</sup>), que utiliza propriedades termodinâmicas do ar ( $t_{bs}$  e UR) para estimativa da quantidade de energia contida em uma mistura de vapor d'água (Rodrigues et al., 2011; Castro Júnior & Silva, 2021). O seu uso tem sido bastante apreciado em regiões de climas tropical e subtropical, onde são registradas elevadas temperaturas na maior parte do ano e, portanto, ocorre elevado gasto de energia pelos animais para ativação de mecanismos de dissipação de calor (Damasceno, 2020).

Em todos os casos, é importante que sejam utilizadas ferramentas computacionais inovadoras, que possam auxiliar na tomada de decisão e contribuir para a melhoria do ambiente (Borges et al., 2010). Dentre as ferramentas utilizadas, destaca-se a geoestatística, que possibilita avaliar dependência e distribuição espacial e interpretar os resultados a partir da estruturação natural dos dados (Cambardella & Elliott, 1992; Medeiros et al., 2014). O emprego desta ferramenta na área de ambiência animal é bastante satisfatório e tem sido feito por diversos pesquisadores (Medeiros et al., 2014; Damasceno et al., 2019; Oliveira et al., 2019; Silva et al., 2020; Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021; Vieira et al., 2021).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente estudo avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial e temporal de variáveis e índices do ambiente térmico no interior de um sistema *Compost Barn* aberto semiclimatizado via ventilação por pressão positiva (CBVP), durante o período de inverno.

### **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado durante o período de três semanas consecutivas, em julho de 2021, no inverno. Nesta estação climática, geralmente são observadas condições de excesso de

umidade da cama, fator este que pode comprometer a viabilidade do sistema de produção *Compost Barn (CB)*.

A pesquisa foi aprovada pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal Viçosa (Processo 04/2021). Todos os procedimentos foram realizados de acordo com as diretrizes recomendadas por esta comissão.

### **3.2.1 Caracterização da instalação e das técnicas de manejo**

Os dados experimentais foram coletados em uma instalação para confinamento de bovinos de leite em fase de lactação, em sistema *Compost Barn* com laterais abertas e semiclimatizado via ventilação por pressão positiva (*CBAVP*). A instalação onde foi realizado o estudo está situada em uma propriedade comercial localizada na mesorregião da Zona da Mata Mineira, nas seguintes coordenadas: latitude 20° 46' 41" S; longitude 42° 48' 51" W; e altitude 670 m. O clima da região é classificado com Cwa – subtropical mesotérmico, com inverno seco e frio e verão chuvoso e quente, conforme classificação climática de Köppen (Sá Júnior et al., 2012).

A instalação foi construída em julho de 2019, está orientada no sentido Sudeste-Noroeste e possui as seguintes características construtivas: 60,0 m de comprimento, 27,6 m de largura, 5,0 m de pé-direito, telhado de duas águas com estrutura e cobertura metálica, presença de abertura central com sobreposição de 1,0 m, e beiral de 2,2 m. A organização espacial do interior do sistema é composta por 864,0 m<sup>2</sup> de área de cama, 252,0 m<sup>2</sup> de corredor de alimentação, onde estavam instalados quatro bebedouros do tipo basculante, com 2,0 m de comprimento cada, 276,0 m<sup>2</sup> de pista de trato, com comedouro único com 60,0 m de comprimento, e 85,8 m<sup>2</sup> de corredor de serviço (Figura 3.1).

A ventilação no sistema *CBAVP* era realizada por pressão positiva, fornecida por meio de seis ventiladores mecânicos de baixo volume e alta rotação, sendo dois ventiladores de 3 hélices, 1,52 m de diâmetro, 1,5 cv de potência, 86.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados na face Sudeste da instalação, e quatro de 6 hélices, diâmetro de 1,53 m, 2,0 cv de potência, 55.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados dois a dois ao longo do comprimento da instalação, a 12,0 e 36,0 m, respectivamente, em relação a face Sudeste (Figura 3.1). Os ventiladores estavam instalados a 3,0 m de altura, com inclinação de 45° em relação a horizontal, e permaneciam ligados continuamente (24,0 h·dia<sup>-1</sup>).

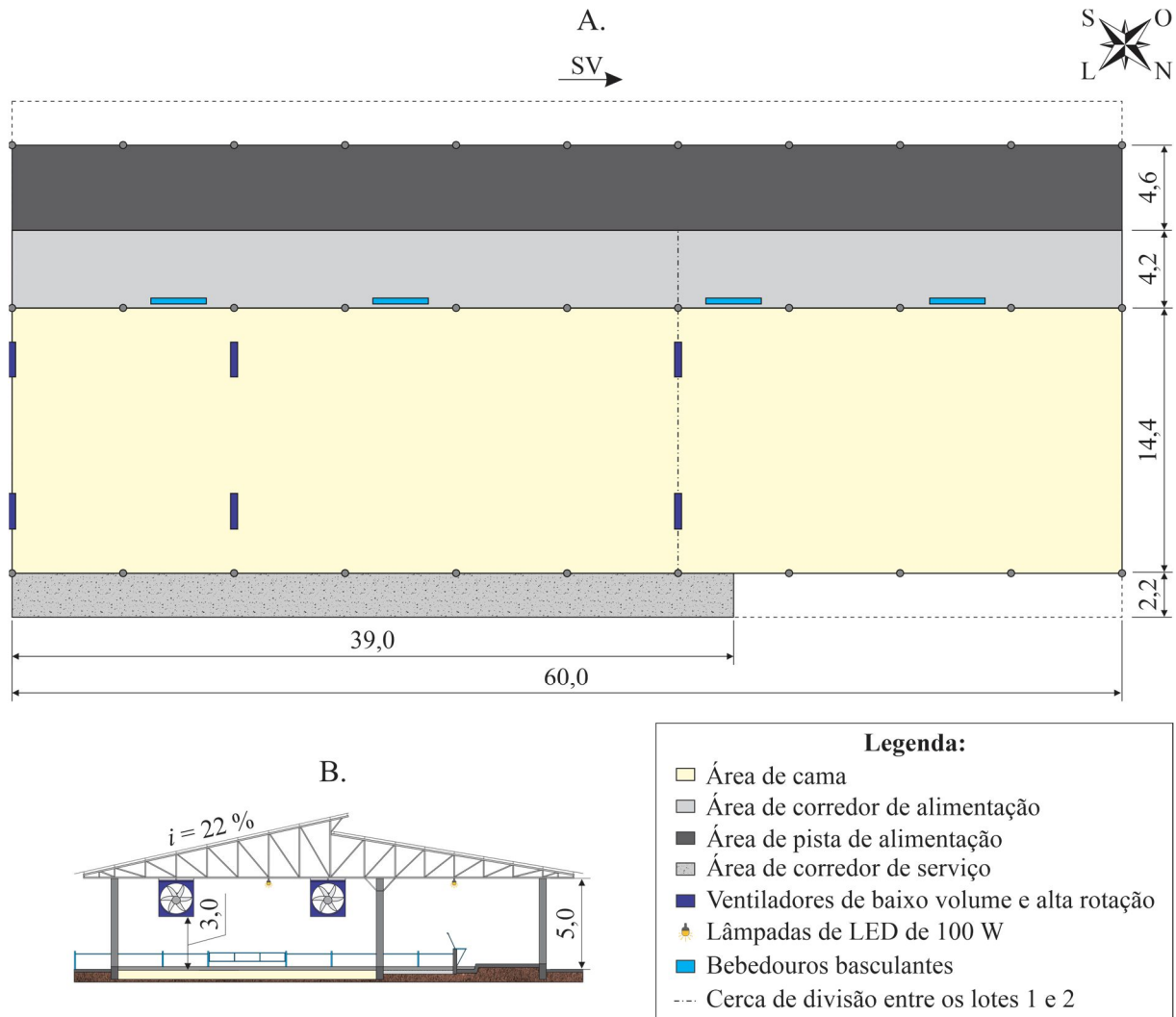


Figura 3.1. Representação esquemática, em planta baixa (A) e corte transversal (B), do sistema *Compost Barn* aberto onde foram coletados os dados experimentais. \*SV – sentido da ventilação;  $i$  – inclinação do telhado; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

A iluminação no interior da instalação era fornecida por meio de dezoito lâmpadas de LED de 100 W, instaladas a 4,8 m acima da cama, e distribuídas ao longo da instalação (nove na região central da área de cama e nove na região de fronteira entre corredor e pista de alimentação). O sistema de iluminação permanecia acionado apenas no período noturno (18h00min às 06h00min).

A área de cama do sistema estava separada do corredor de alimentação por meio de uma pequena mureta de concreto com 0,2 m de altura, com a função de evitar a passagem de material de cama para o corredor de alimentação e/ou de dejetos do corredor de alimentação para a área de cama. Esta pequena mureta estava presente nas cinco passagens de acesso da área de cama para o corredor de alimentação. Nos locais onde estavam instalados bebedouros, foram construídas muretas de concreto mais altas (1,2 m), para conter os animais, evitando que os

mesmos tivessem acesso à água diretamente da área de cama, o que poderia molhá-la. O piso dos corredores de alimentação, de serviço e da pista de trato era de concreto com frisos.

O material utilizado para compor o substrato “cama” era constituído de uma mistura de maravalha e serragem de madeira, disposta em forma de “colchão” com espessura aproximada de 0,6 m. Para composição da cama, inicialmente foi adicionada uma camada de serragem seca com 0,3 m de espessura, que, junto com as fezes e urina depositadas pelos animais, iniciaram o processo de semi-compostagem. A reposição deste material com substrato seco era realizada sempre que a umidade da cama se elevava muito, condição esta observada quando ocorria sujidade excessiva dos animais, excessiva compactação e consequente situação de anaerobiose no composto. Tal reposição ou complementação ocorreu por duas vezes durante o período experimental, quando foi verificado (visualmente) que a cama apresentava excesso de umidade. O presente estudo teve início cerca de quatro meses após a troca da cama e, durante o período experimental, foram realizadas apenas pequenas reposições.

O revolvimento do material de cama era realizado utilizando um implemento híbrido (escarificador de cama com rolo destoroador com 2,0 m de largura de atuação, 5 hastes com 0,5 m de profundidade máxima e 540 rpm de rotação máxima) com profundidade efetiva de revolvimento de 0,3 m, acoplado a um trator (linha leve, 78 cv e 2400 rpm de rotação nominal). Esta operação era realizada diariamente por duas vezes (09h00min e 16h00min), seguindo rotina estabelecida na fazenda.

Mantendo-se a rotina da fazenda, os animais alojados no interior da instalação permaneceram distribuídos em dois lotes, conforme sua produtividade de leite. As vacas com maior produtividade (Lote 1) ficavam alojadas em região específica do galpão, delimitada ao mencionado Lote 1, perfazendo área de cama de 518,4 m<sup>2</sup> (36,0 x 14,4 m), situada próximo a face Sudeste da instalação. Os animais com menor produtividade (Lote 2) permaneceram alojados na região específica do galpão, delimitada ao mencionado Lote 2, perfazendo área de cama de 345,6 m<sup>2</sup> (24,0 x 14,4 m), localizada próximo da face Noroeste da instalação. Durante o período experimental, 80 vacas Holandesas em lactação (Puro de Origem – PO, peso médio de 600 kg) permaneceram alojadas no interior da instalação, das quais 45 constituíam o Lote 1 (11,5 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup>), e 35 ficaram confinadas no Lote 2 (9,9 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup>).

Ao longo do período experimental, a rotina padrão de atividades no sistema *CBAVP* foi mantida, com realização de ordenhas e fornecimento de alimentação duas vezes ao dia. As ordenhas tinham início às 04h00min e às 16h00min, com duração média de 02h30min, e eram realizadas em uma sala tipo espinha de peixe 2x6, localizada em anexo ao sistema *CBAVP*. Durante todo o dia, os animais tinham acesso ao corredor de alimentação, onde era

disponibilizada alimentação e água, sem restrições. O piso do corredor de alimentação era lavado uma vez ao dia, no período manhã, utilizando sistema *flushing*.

### 3.2.2 Sistema de aquisição de dados microclimáticos

A aquisição dos dados microclimáticos (temperatura de bulbo seco do ar –  $t_{bs}$ , e umidade relativa do ar – UR), no interior do sistema e no ambiente externo (abrigo meteorológico), foi realizada a cada 5 minutos,  $24 \text{ h} \cdot \text{dia}^{-1}$ , durante todo o período experimental, compreendendo três semanas consecutivas (julho de 2021).

Para coleta dos dados de interesse no interior do sistema, a zona de ocupação dos animais (ZOA), composta pelas áreas de cama e de corredor de alimentação, foi dividida por meio de uma malha regular (6,0 x 4,5 m), composta por 55 pontos equidistantes, com marcações realizadas de acordo com as características construtivas da instalação (Figura 3.2A). Os sensores foram instalados 2,5 m acima do nível da cama e do piso do corredor de alimentação (Figura 3.2B), para possibilitar a passagem do trator utilizado para revolvimento diário da cama.

As medições das variáveis  $t_{bs}$  e UR foram realizadas utilizando componentes eletrônicos (Sensores DHT22, modelo AM2302; faixa de medição de temperatura de  $-40,0$  a  $80,0^\circ\text{C}$  e acurácia de  $0,5^\circ\text{C}$ ; faixa de medição de umidade de 0 a 100% e acurácia de 2%; Aosong Electronics Co. Ltd, Guangzhou, China), distribuídos nos 55 pontos de coleta, ao longo da ZOA. Para fins de processamento e registro dos dados coletados, a malha foi dividida em 11 linhas de coleta (LCs), compostas cada uma por 5 sensores e 1 módulo de coleta e registro de dados. Cada um dos 11 módulos de coleta e registro de dados consistia em uma placa Arduino Uno R3 (Microcontrolador ATmega328; Tensão de alimentação 5,0 V; Velocidade de Clock 16 MHz; Atmel Corporation, San Jose, USA), conectada em um Data Logger Shield com RTC e Leitor SD (Slot para cartão SD, Relógio em tempo Real integrado DS1307; Formatação do cartão FAT16 ou FAT32; Tensão de alimentação de 3,3 V; Dallas Semiconductor, Dallas, USA) e um Display LCD 16x2 (I2C Backlight Azul, Tensão de alimentação 5,0 V; Comunicação 4 ou 8 bits; Beijing Qingyun Innovation and Technology Development Co. Ltd., Shenzhen, China), conforme metodologia adaptada de Freitas et al. (2019). O Data Logger Shield com RTC e Leitor SD foi utilizado para controle do tempo e registro dos dados em um cartão SD, ao passo que o Display LCD 16x2 foi utilizado para visualização dos dados de data, hora,  $t_{bs}$  e UR registrados.

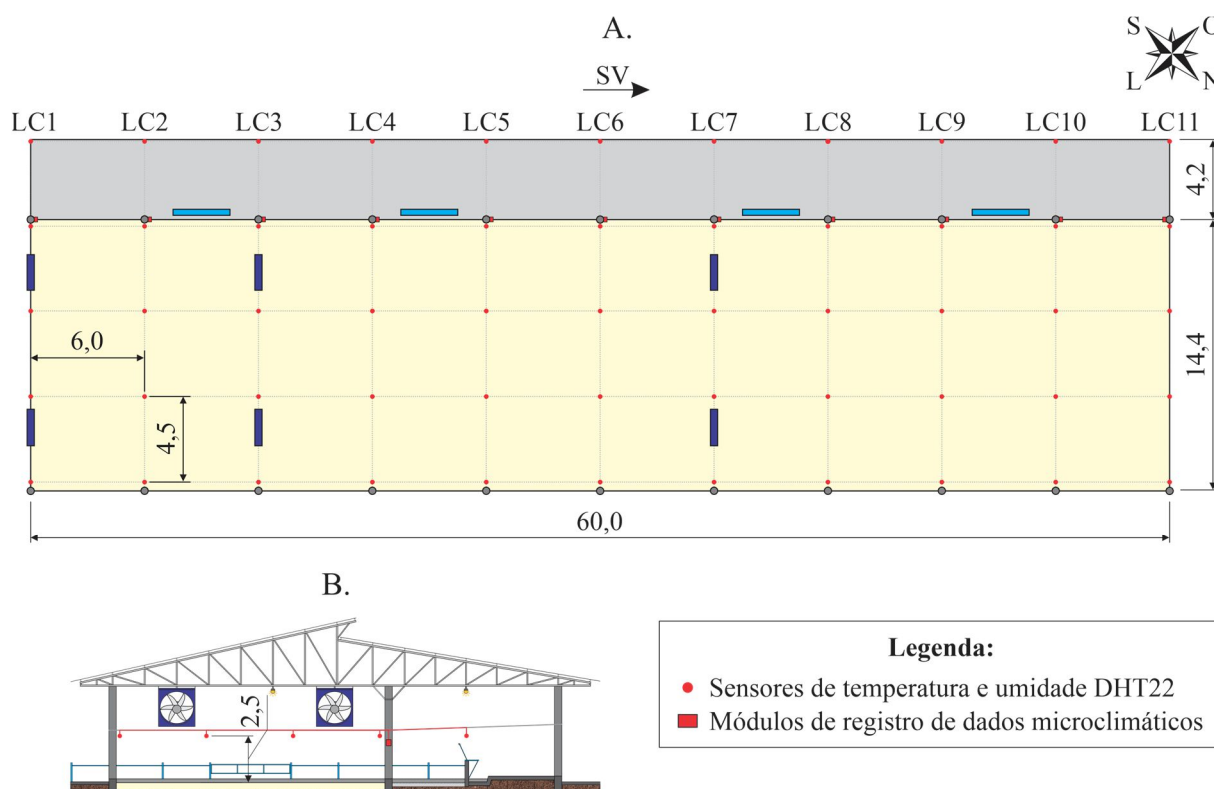


Figura 3.2. Representação esquemática, em planta baixa (A) e corte transversal (B), da malha de pontos de coleta de dados microclimáticos no interior do sistema *Compost Barn* aberto. \*SV – sentido da ventilação; LC – linha de coleta; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Para caracterização do ambiente externo, próximo ao galpão foi instalado um abrigo meteorológico onde foram coletados dados de  $t_{bs}$  e UR. Os registros de  $t_{bs}$  e UR foram realizadas utilizando um sensor registrador (HOBO<sup>®</sup>, modelo U14-002; faixa de medida de temperatura entre  $-20,0$  e  $50,0$  °C, e acurácia de  $0,2$  °C; faixa de medida de umidade relativa entre 0 e 100%, e acurácia de 2,5%). Do mesmo modo que no interior da instalação, os dados foram coletados a cada 5 minutos,  $24,0$  h·dia<sup>-1</sup>, durante as três semanas do período experimental.

Foram utilizados dados médios diários de  $t_{bs}$  e UR obtidos em quatro períodos do dia: madrugada (00h00min às 05h59min), manhã (06h00min às 11h59min), tarde (12h00min às 17h59min) e noite (18h00min às 23h59min). Tal divisão foi realizada com o objetivo de identificar a ocorrência de horários com condições ambientais críticas.

### 3.2.3 Avaliação do conforto térmico ambiente

A avaliação inicial do ambiente térmico foi realizada por meio dos elementos climáticos  $t_{bs}$  e UR. Com este fim, foram delimitadas faixas de  $t_{bs}$  e UR consideradas como ótima, termoneutra e crítica para bovinos leiteiros da raça holandesa em fase de lactação. Tais faixas foram estabelecidas com base em estudos e materiais técnicos publicados por diversos

especialistas (Berman et al., 1985; Nääs, 1989; Bucklin et al., 1991; Igono et al., 1992; Cortez & Magalhães, 1993; Roenfeldt, 1998; West, 2003; Perissinotto & Moura, 2007; Baêta & Souza, 2010). Na Tabela 3.1 estão listadas as faixas de  $t_{bs}$  e UR estabelecidas no presente estudo, assim como os intervalos de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia Específica do Ar (H) calculadas a partir dos valores de  $t_{bs}$  e UR considerados ótimos, termoneutros e críticos para bovinos leiteiros da raça holandesa em fase de lactação.

Tabela 3.1. Classificação de conforto térmico para bovinos leiteiros da raça holandesa em fase de lactação.

| $t_{bs}$<br>(°C)          | UR<br>(%)             | ITU                    | H<br>(kJ·kg de ar seco <sup>-1</sup> ) | Classificação    |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------------------|------------------|
| $t_{bs} < 4,0$            | UR < 30,0             | ITU < 46,0             | H < 8,0                                | Zona crítica     |
| $4,0 \leq t_{bs} < 12,0$  | $30,0 \leq UR < 50,0$ | $46,0 \leq ITU < 55,0$ | $8,0 \leq H < 24,0$                    | Zona termoneutra |
| $12,0 \leq t_{bs} < 18,0$ | $50,0 \leq UR < 60,0$ | $55,0 \leq ITU < 63,0$ | $24,0 \leq H < 39,0$                   | Zona ótima       |
| $18,0 \leq t_{bs} < 24,0$ | $60,0 \leq UR < 75,0$ | $63,0 \leq ITU < 74,0$ | $39 \leq H < 62,0$                     | Zona termoneutra |
| $t_{bs} \geq 24,0$        | UR ≥ 75,0             | ITU ≥ 74,0             | H ≥ 62,0                               | Zona crítica     |

\*  $t_{bs}$  – temperatura de bulbo seco do ar; UR – umidade relativa do ar; ITU – Índice de temperatura e Umidade; H – Entalpia Específica do Ar.

Os dados de  $t_{bs}$  e UR registrados durante o período experimental de inverno foram utilizados para cálculo do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da Entalpia Específica do ar (H), aplicados à avaliação do conforto térmico dos bovinos leiteiros alojados na instalação.

O ITU foi calculado por meio da Equação 3.1, conforme modelo proposto por Mader et al. (2006).

$$ITU = 0,8 \cdot t_{bs} + UR \cdot \left( \frac{t_{bs} - 14,3}{100} \right) + 46,3 \quad (3.1)$$

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

UR é a umidade relativa do ar, em %.

A H (em kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>) foi calculada de acordo com o modelo proposto por Rodrigues et al. (2011):

$$H = 1,006 \cdot t_{bs} + \frac{UR}{PB} \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot t_{bs}}{237,3 + t_{bs}}} \cdot (71,28 + 0,052 \cdot t_{bs}) \quad (3.2)$$

Em que: PB é a pressão barométrica local, igual a 706 mmHg.

### 3.2.4 Análises estatísticas

#### 3.2.4.1 Análise descritiva dos dados ambientais

A análise inicial dos dados do ambiente térmico registrados ao longo das três semanas do período experimental foi realizada utilizando estatística descritiva. Primariamente, foram obtidos dados diários médios, mínimos absolutos e máximos absolutos de  $t_{bs}$  e UR, utilizados para avaliação do comportamento destas variáveis ao longo do período experimental de inverno. Conjuntamente, foram calculados valores médios horários das variáveis ( $t_{bs}$  e UR) e dos índices (ITU e H), aplicados à avaliação da variação destes atributos ao longo do dia.

Por fim, para os dados médios diários de  $t_{bs}$ , UR, ITU e H por período (madrugada, manhã, tarde e noite), foram obtidos valores de média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), curtose (Curt.) e assimetria (Ass.). Para avaliação da dispersão dos dados experimentais, adotou-se a classificação de CV proposta por Warrick & Nielsen (1980):  $CV < 0,12$  – baixa dispersão;  $0,12 \leq CV < 0,24$  – moderada dispersão; e  $CV \geq 0,24$  – alta dispersão.

#### 3.2.4.2 Análise de variabilidade e distribuição espacial dos dados ambientais

Para avaliar o comportamento espacial das variáveis ( $t_{bs}$  e UR) e dos índices (ITU e H) no interior da instalação, bem como verificar se possuem dependência espacial, foram utilizadas técnicas de geoestatística. As análises geoestatísticas foram realizadas utilizando o sistema computacional R Development Core Team (2016), por meio da biblioteca geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001).

Para avaliar a dependência espacial das variáveis de interesse na área interna da instalação, foram realizados ajustes de semivariograma, utilizando o estimador de Matheron (1962), conforme a Equação 3.3.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (3.3)$$

Em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância;

$N(h)$  é o número de pares de observações  $Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$ ;

$Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$  são as observações experimentais; e

$h$  é a distância que separa as observações experimentais.

Os ajustes de semivariogramas experimentais foram realizados empregando-se os métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*) e da Máxima Verossimilhança Restrita (*Restricted Maximum Likelihood – REML*). Para cada método, foram testados os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano (Equações 3.4, 3.5 e 3.6, respectivamente), conforme descrito por Vieira et al. (2010).

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right) - 0,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right], \text{ se } h \leq a \quad (3.4)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1, \text{ se } h > a$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1 - \text{EXP} \left( \frac{-3h}{a} \right) \right] \quad (3.5)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left\{ 1 - \text{EXP} \left[ -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.6)$$

Em que:  $C_0$  é o efeito pepita;

$C_1$  é o patamar; e

$a$  é o alcance.

Para avaliação e escolha dos ajustes obtidos, foram realizados procedimentos de validação cruzada, sendo calculados erro médio ( $EM$ ), desvio padrão do erro médio ( $DP_M$ ), erro reduzido ( $ER$ ) e desvio padrão do erro reduzido ( $DP_R$ ). A partir dos ajustes obtidos utilizando os métodos e modelos descritos, para cada variável foi escolhido o ajuste em que se obteve  $EM$  e  $ER$  mais próximos de zero, menor  $DP_M$  e  $DP_R$  mais próximo de um, conforme recomendado por Isaaks & Srivastava (1989).

A partir dos modelos matemáticos  $\hat{\gamma}(h)$  escolhidos para cada variável, foram obtidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ), alcance ( $a$ ) e alcance prático ( $a'$ ).

A verificação de ocorrência de dependência espacial foi realizada utilizando o grau de dependência espacial ( $GDE$ ), determinado por meio da razão entre efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C_0 + C_1$ ). Para análise do  $GDE$ , foi utilizada a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera como dependência espacial forte os semivariogramas com  $GDE \leq 0,25$ , moderada os semivariogramas com  $0,25 < GDE \leq 0,75$ , e fraca os semivariogramas com  $GDE > 0,75$ .

Finalmente, após escolhidos os semivariogramas teóricos com melhores ajustes, bem como verificada a ocorrência de dependência espacial, a técnica de krigagem ordinária foi

utilizada para predição dos níveis das variáveis e índices de interesse em locais não amostrados no interior da instalação. A partir dos dados interpolados, foram gerados mapas de superfície resposta, utilizando-se o programa computacional ArqGIS<sup>®</sup>, versão 10.1, com licença para utilização do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

### **3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Buscando avaliar de maneira mais completa o microambiente no interior e exterior do sistema em estudo, o tópico de Resultados e Discussão foi dividido em duas partes. No primeiro subtópico estão apresentadas e discutidas as análises de distribuição temporal de dados do ambiente térmico interno e externo (variações ao longo do período experimental e ao longo do dia). O segundo subtópico compreende as análises de distribuição espacial dos dados médios horários registrados ( $t_{bs}$  e UR) e calculados (ITU e H) no interior do sistema avaliado, durante as três semanas do período experimental.

#### **3.3.1 Distribuição temporal de variáveis do ambiente térmico**

Na Figura 3.3 estão ilustradas as curvas de valores médios, mínimos e máximos absolutos diários de  $t_{bs}$  (em °C) e UR (em %), registrados no interior e exterior da instalação.

Em relação a  $t_{bs}$ , pode-se observar que as curvas de dados internos e externos (valores médios, mínimos e máximos absoluto) tiveram perfis semelhantes ao longo do período experimental, sendo próximas entre si (Figura 3.3A). Tal fato já era esperado, uma vez que se tratava de uma instalação aberta, em que geralmente há alta correlação entre temperaturas interna e externa (Endres et al., 2011).

Os valores de  $t_{bs}$  mínima absoluta diária registrados ao longo do período experimental de inverno foram sempre superiores a 4,0 °C (interior e exterior), sendo que os mais baixos foram registrados no interior da instalação. Os valores mais baixos foram registrados no 18º dia de coleta, sendo 4,7 °C no ambiente interno e 5,3 °C no ambiente externo.

Observando os valores médios e máximos absolutos de  $t_{bs}$  registrados no interior e exterior da instalação (Figura 3.3A), pode-se verificar que as curvas tiveram comportamentos semelhantes ao que foi observado para  $t_{bs}$  mínima absoluta. Isso significa que nos dias em que foram registrados os menores valores de  $t_{bs}$  mínima absoluta, também foram observados níveis mais baixos de  $t_{bs}$  média e  $t_{bs}$  máxima absoluta. De fato, em dias com madrugadas mais frias há tendência ao registro de temperaturas média e máxima também mais baixas.

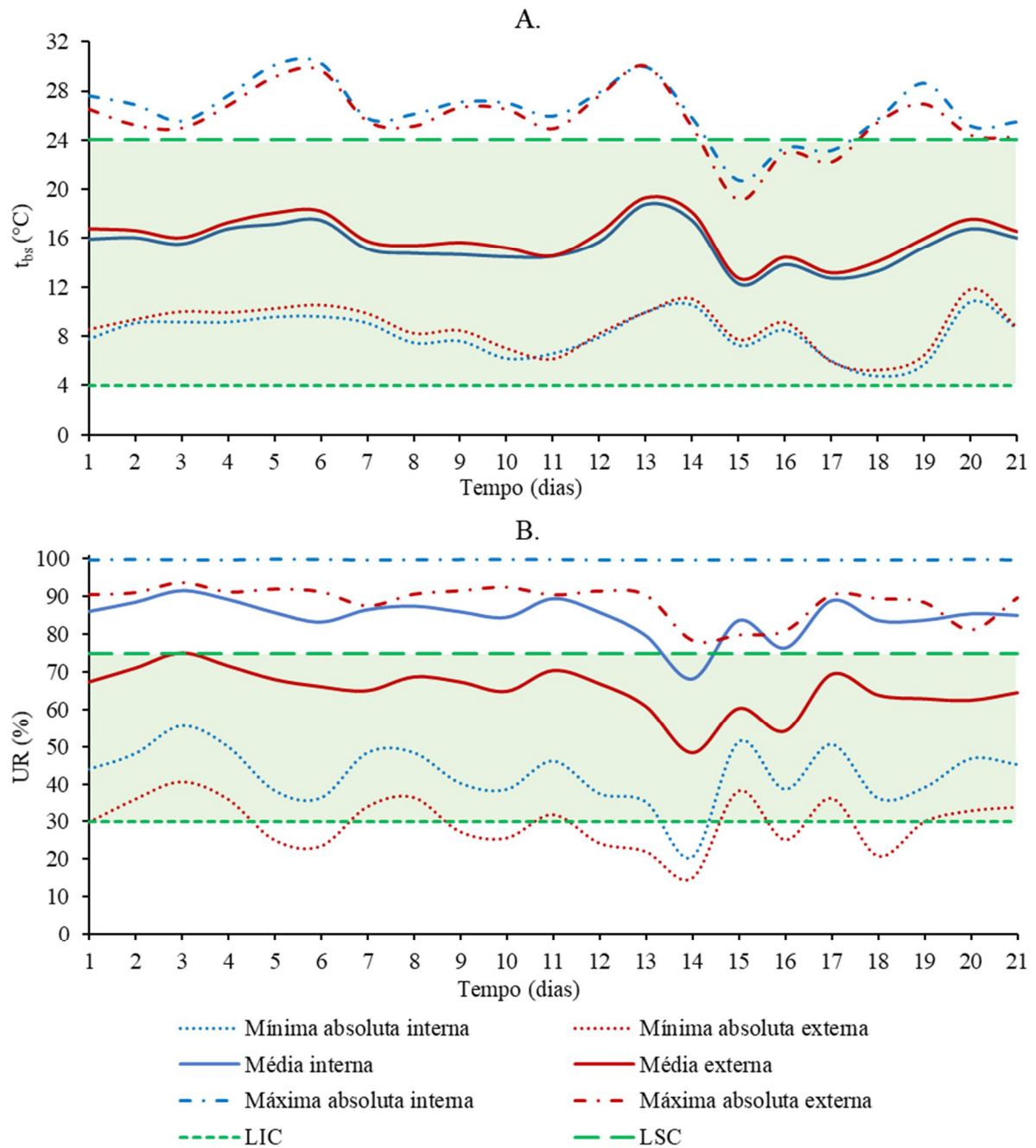


Figura 3.3. Curvas de valores médios, mínimos e máximos absolutos de temperatura de bulbo seco do ar –  $t_{bs}$  (A) e umidade relativa do ar – UR (B) ao longo dos dias do período experimental de inverno, nos ambientes interno e externo do sistema *Compost Barn* aberto. \*LIC – limite inferior de conforto térmico; LSC – limite superior de conforto térmico. Fonte: O autor (2022).

Os valores médios mais baixos de  $t_{bs}$  foram registrados no 15º dia de coleta, sendo 12,2 °C no ambiente interno, e 12,8 °C no ambiente externo, ao passo que os mais elevados foram observados no 13º dia de coleta (18,8 °C no ambiente interno, e 19,4 °C no ambiente externo). Para  $t_{bs}$  máxima absoluta, a condição mais crítica ocorreu no 6º dia de coleta, quando foram registrados os maiores valores internos e externos (30,3 e 29,6 °C, respectivamente).

Com relação aos níveis mínimos de  $t_{bs}$ , é possível observar que os valores registrados no interior do sistema foram superiores ao limite inferior de conforto térmico (LIC) para bovinos leiteiros em lactação ( $4,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – Tabela 3.1). Deste modo, pode-se concluir que no período experimental de inverno os animais alojados não ficaram expostos a condições hipotérmicas, em que não conseguiriam produzir calor suficiente para manter sua temperatura corporal dentro da faixa ideal (Rosenberg et al., 1983; Baêta & Souza, 2010).

Por outro lado, na maioria dos dias do período experimental foram registrados valores de  $t_{bs}$  máxima absoluta superiores ao limite superior de conforto térmico (LSC) estabelecido para bovinos leiteiros em lactação ( $24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – Tabela 3.1). Isso significa que em algum horário a  $t_{bs}$  esteve acima da temperatura crítica superior considerada para os animais alojados. Quando isso acontece, os mecanismos de controle de temperatura dos animais não são capazes de assegurar resfriamento suficiente para manter a temperatura corporal dentro da faixa ideal, podendo causar estresse térmico e gerar perdas produtivas e de qualidade do leite (Akyuz et al., 2010; Baêta & Souza, 2010). Os resultados observados indicam que, mesmo durante o período de inverno, os animais podem ter ficado expostos a condições de estresse térmico por hipertermia em alguns horários. Deste modo, é recomendável que sejam realizadas intervenções, como molhamento dos animais no corredor de alimentação e uso de sistemas de ventilação de baixa pressão estática, para evitar perdas produtivas.

Em relação a UR (Figura 3.3B), é possível verificar que os comportamentos das curvas de dados mínimos absolutos e médios foram semelhantes, ao passo que o perfil de UR máxima absoluta no interior do sistema foi praticamente constante ao longo do período ( $UR \cong 100,0\%$ ) e teve pequena variação no exterior da instalação. Do mesmo modo que  $t_{bs}$ , os níveis de UR tiveram comportamento variável no tempo, sendo registrados valores mínimo e máximo absolutos iguais a 20,6 e 100,0%, respectivamente. Os valores registrados no interior do sistema foram sempre superiores aos observados no ambiente externo (abrigo meteorológico), com diferença média de 14,5%. Pode-se inferir que a ocorrência de níveis mais elevados de UR ambiente interno é devido a umidade liberada durante o processo de semi-compostagem da cama, evaporação de água de bebedouros, e liberação de água via respiração e dejetos dos animais (Damasceno et al., 2019; Oliveira et al., 2019).

Durante o período experimental, somente no 14º dia de coleta foi registrado valor de UR abaixo ao LIC para bovinos leiteiros em lactação (30,0%) (Cortez & Magalhães, 1993). Neste dia, a UR mínima absoluta nos ambientes interno e externo foi igual a 20,6 e 15,0%, respectivamente. Apesar de favorecer a dissipação de calor, os baixos níveis de UR registrados

podem ter causado ressecamento das mucosas e vias respiratórias dos animais alojados, conforme retratado por Ferreira (2016).

Os níveis médios de UR mais baixos foram registrados no 14º dia de coleta, sendo 68,3% no ambiente interno e 48,4% no ambiente externo, ao passo que os mais elevados foram observados em 3º dia de coleta (91,4% no ambiente interno, e 75,2% no ambiente externo). Na maioria dos dias do período experimental, a UR média no interior do sistema esteve acima do LSC recomendado pela literatura para bovinos leiteiros em lactação (75,0%) (Nääs, 1989). Apenas no 14º dia de coleta foi registrado valor médio de UR inferior ao LSC (68,3%). Além de dificultar a dissipação de calor, elevados níveis de UR podem acarretar diversos problemas aos produtores, tais como aumento de doenças respiratórias (pneumonia, bronquite etc.), de umidade da cama, de índices de sujidade, de ocorrência de mastite, de contagem de células somáticas etc. (Baêta & Souza, 2010; Black et al., 2014; Damasceno, 2020; Leso et al., 2020). O registro de elevados valores de UR é um indício de que é necessário realizar intervenções neste sistema, com o objetivo de melhorar o ambiente para os animais alojados.

As curvas médias horárias de  $t_{bs}$  e UR nos ambientes interno e externo do sistema estão ilustradas na Figura 3.4.

Por meio da Figura 3.4A, observa-se que os valores médios horários de  $t_{bs}$  no interior e no exterior do sistema apresentaram perfis semelhantes, mas os valores de  $t_{bs}$  externa foram superiores aos internos na maior parte do tempo. É possível notar também que no intervalo das 00h00min às 09h00min os valores médios de  $t_{bs}$  no interior do sistema são muito próximos aos registrados no exterior da instalação e, a partir deste horário (09h00min às 21h00min), os níveis de temperatura no interior da instalação tendem a ser mais baixos (diferença média de 1,2 °C entre os ambientes interno e externo).

Os valores de  $t_{bs}$  registrados no interior da instalação neste estudo diferem dos retratados por Pilatti et al. (2019) e Guesine (2020), que observaram a ocorrência de valores de  $t_{bs}$  mais elevados no interior de sistemas *CB*, em contraponto ao ambiente externo. Neste caso, pode-se inferir que a utilização de ventilação mecânica (*LVHS*) possibilitou reduzir os níveis de  $t_{bs}$  no interior do sistema nos horários mais quentes do dia, conforme retratado por Oliveira et al. (2019) em um estudo conduzido em Minas Gerais.

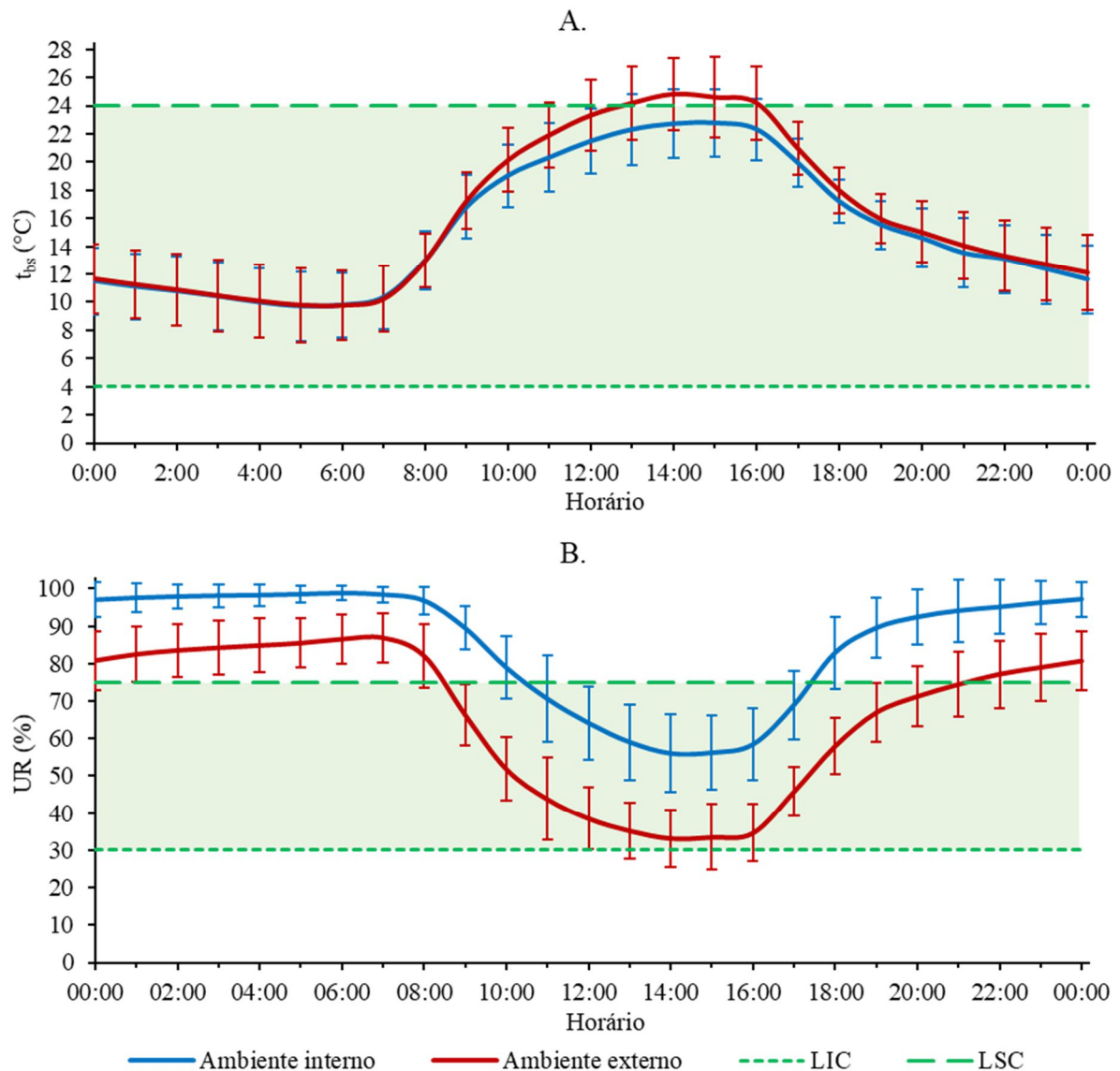


Figura 3.4. Perfis médios horários, com desvio padrão, de temperatura de bulbo seco do ar –  $t_{bs}$  (A) e umidade relativa do ar – UR (B) ao longo do dia, nos ambientes interno e externo da instalação, durante o período de inverno. \*LIC – limite inferior de conforto térmico; LSC – limite superior de conforto térmico. Fonte: O autor (2022).

Com relação a UR, os valores médios horários no interior do sistema foram superiores aos registrados no exterior da instalação na maior parte do tempo (Figura 3.4B). Pode-se observar que as curvas médias horárias de UR tiveram diferença aproximadamente constante ao longo do dia, com níveis internos cerca de 23,6% superiores aos externos. Em sistemas *CB* abertos, os níveis de UR são influenciados por fatores internos (condições de cama, taxa de ventilação, densidade de animais alojados etc.) e externos (condições climáticas locais, época do ano etc.) (Damasceno, 2020; Andrade, 2021). Logo, pode-se concluir que o registro de

valores mais elevados de UR ao longo de todo o dia no interior da instalação é um indicativo de que o ambiente interno teve grande contribuição para a elevação deste atributo.

Na Figura 3.5 estão ilustradas curvas médias horárias de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia Específica do Ar (H, em  $\text{kJ}\cdot\text{kg de ar seco}^{-1}$ ), obtidas durante o período de inverno, nos ambientes interno e externo ao sistema *CBAVP*.

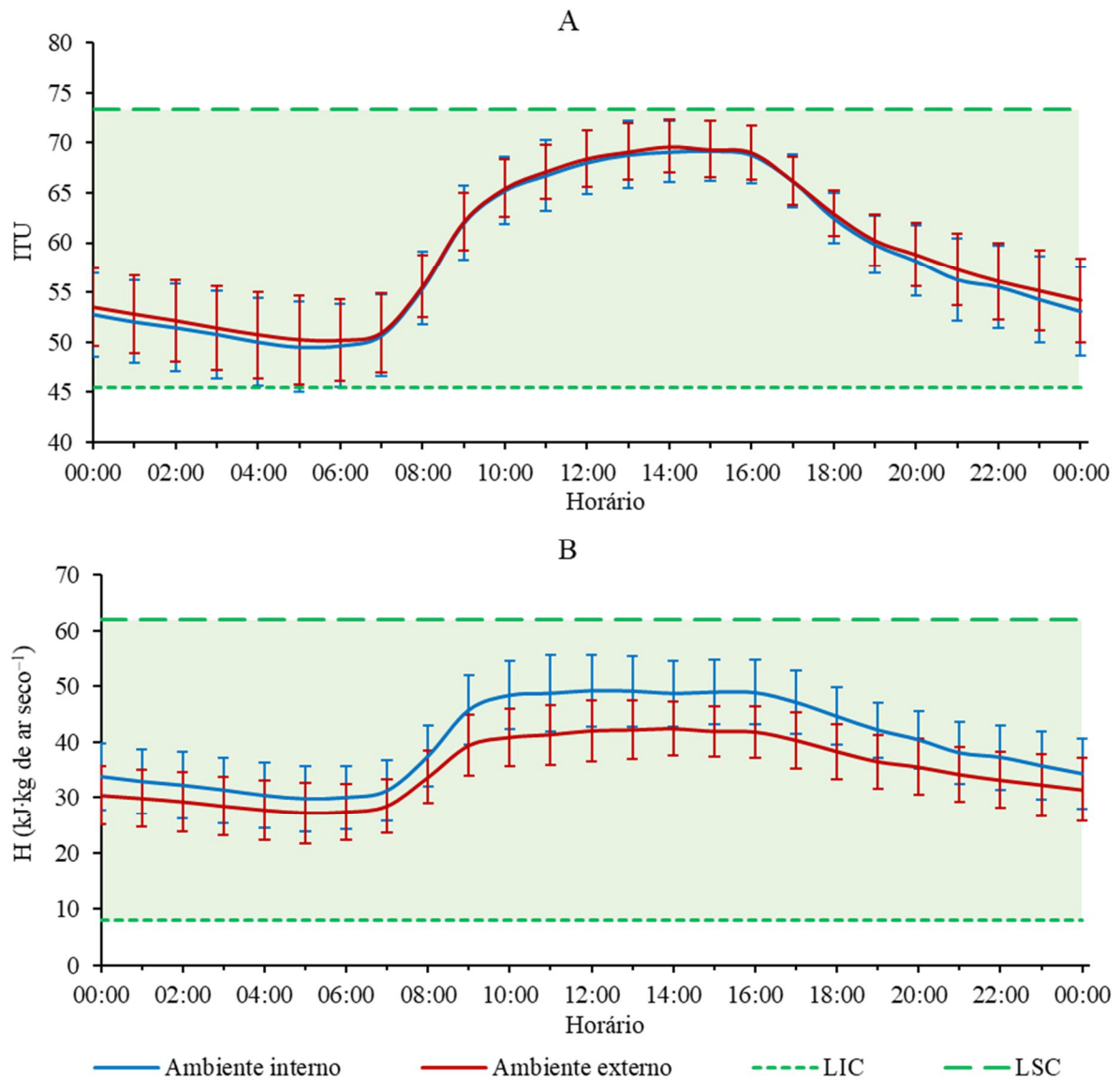


Figura 3.5. Perfis médios horários de Índice de Temperatura e Umidade – ITU (A) e Entalpia Específica do Ar – H (B) ao longo do dia, nos ambientes interno e externo da instalação, durante o período de inverno. \*LIC – limite inferior de conforto térmico; LSC – limite superior de conforto térmico. Fonte: O autor (2022).

Por meio da Figura 3.5A, pode-se observar que as curvas médias horárias de ITU tiveram perfis similares aos que foram observados para  $t_{bs}$ , fato esperado, uma vez que este

atributo possui maior peso para composição do ITU. Para tais curvas, verificou-se que os valores interno e externo obtidos permaneceram praticamente iguais ao longo de todo o dia. Neste caso, a ocorrência de horários com valores externos de ITU mais elevados não foi observada em virtude dos elevados valores internos de UR, que retornaram valores de ITU interno muito próximos dos observados no exterior da instalação, mesmo em horários em que se registrava maior  $t_{bs}$  externa.

Ao longo do dia (Figura 3.5A), pode-se observar que os valores de ITU calculados mantiveram-se dentro da faixa estabelecida neste estudo como de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação ( $46,0 \leq \text{ITU} < 74,0$  – Tabela 3.1), estando sempre abaixo de 74,0, limite superior de ITU recomendado por Mader et al. (2006). Portanto, por meio do uso deste índice pode-se concluir que, durante o período experimental de inverno, os animais alojados não ficaram expostos a condições de estresse térmico no interior do sistema *CBAVP*.

Com relação a H (Figura 3.5B), verificou-se que as curvas médias horárias dos valores interno e externo tiveram perfis semelhantes, mas que os níveis internos foram sempre superiores aos obtidos no exterior do sistema. A ocorrência de níveis de H mais altos no interior da instalação deve-se aos elevados valores de UR registrados neste ambiente, que, conseqüentemente, elevaram os valores de H obtidos.

Mesmo que obtidos níveis de H mais elevados no interior do sistema, os valores observados permaneceram dentro da faixa termoneutra para bovinos leiteiros em lactação ( $8,0 \leq H < 62,0$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup> – Tabela 3.1). Logo, pode-se concluir que a quantidade de calor presente no interior da instalação durante este período não caracterizou um problema do ponto de vista de conforto térmico.

### 3.3.2 Dependência e distribuição espacial de variáveis do ambiente térmico

Na Tabela 3.2 estão listados dados da análise descritiva das variáveis ( $t_{bs}$  e UR) e índices (ITU e H) registrados no interior do sistema *CBAVP*, nos períodos madrugada (00h00min às 05h59min), manhã (06h00min às 11h59min), tarde (12h00min às 17h59min) e noite (18h00min às 23h59min).

Durante o período experimental, os valores mínimos e máximos de  $t_{bs}$  foram registrados nos períodos madrugada e tarde ( $10,5 \pm 0,2$  e  $21,7 \pm 0,3$  °C, respectivamente) (Tabela 3.2). Conforme esperado, observou-se que os dados de UR tiveram comportamento inverso a  $t_{bs}$ , sendo registrados valores mais elevados no período madrugada ( $98,1 \pm 0,7\%$ ) e mais baixos no período tarde ( $61,7 \pm 1,8\%$ ).

Tabela 3.2. Análise descritiva dos valores médios horários das variáveis e índices temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em °C), umidade relativa do ar (UR, em %), Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia (H, em kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>) no interior da instalação.

| Variável | Período   | Média | Mediana | Mínimo | Máximo | DP  | CV   | Curt. | Ass.  |
|----------|-----------|-------|---------|--------|--------|-----|------|-------|-------|
| $t_{bs}$ | Madrugada | 10,5  | 10,5    | 10,0   | 10,9   | 0,2 | 0,02 | 2,28  | 0,04  |
|          | Manhã     | 15,7  | 15,6    | 15,0   | 16,4   | 0,2 | 0,01 | 3,60  | 0,43  |
|          | Tarde     | 21,7  | 21,6    | 21,1   | 23,2   | 0,3 | 0,01 | 6,19  | 1,78  |
|          | Noite     | 14,1  | 14,0    | 13,6   | 14,5   | 0,2 | 0,01 | 2,13  | 0,03  |
| UR       | Madrugada | 98,1  | 98,2    | 93,6   | 99,7   | 0,7 | 0,01 | 6,85  | -1,38 |
|          | Manhã     | 86,7  | 86,9    | 80,4   | 90,5   | 1,2 | 0,01 | 3,91  | -0,46 |
|          | Tarde     | 61,7  | 61,8    | 54,2   | 66,6   | 1,8 | 0,03 | 3,18  | -0,48 |
|          | Noite     | 92,9  | 92,9    | 86,5   | 96,9   | 1,3 | 0,01 | 4,28  | -0,43 |
| ITU      | Madrugada | 50,9  | 50,9    | 50,0   | 51,6   | 0,3 | 0,01 | 2,27  | 0,05  |
|          | Manhã     | 60,0  | 60,0    | 58,9   | 61,2   | 0,3 | 0,01 | 3,41  | 0,34  |
|          | Tarde     | 68,3  | 68,2    | 67,3   | 69,7   | 0,4 | 0,01 | 4,42  | 1,17  |
|          | Noite     | 57,3  | 57,3    | 56,5   | 58,1   | 0,3 | 0,01 | 2,15  | 0,03  |
| H        | Madrugada | 31,2  | 31,2    | 29,8   | 32,4   | 0,4 | 0,01 | 2,23  | 0,14  |
|          | Manhã     | 41,5  | 41,5    | 39,3   | 43,4   | 0,6 | 0,01 | 2,86  | -0,03 |
|          | Tarde     | 48,7  | 48,7    | 46,1   | 50,9   | 0,8 | 0,02 | 2,44  | -0,02 |
|          | Noite     | 39,0  | 39,0    | 37,2   | 40,7   | 0,6 | 0,01 | 2,61  | 0,00  |

\* DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Curt. – curtose; Ass. – assimetria.

Como o ITU e a H são obtidos a partir do efeito combinado de  $t_{bs}$  e UR, observou-se que as variações de valores obtidos para estes índices foram semelhantes aos de  $t_{bs}$ , que possui maior peso na composição de ambos. Deste modo, as médias mais elevadas ocorreram no período tarde (ITU =  $68,3 \pm 0,4$  e H =  $48,7 \pm 0,8$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), ao passo que as mais baixas foram registradas no período madrugada (ITU =  $50,9 \pm 0,3$  e H =  $31,2 \pm 0,4$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>).

Para todas as variáveis e em todos os períodos avaliados, pode-se observar que os valores de média e mediana foram próximos entre si, indicativo de que os dados não apresentavam assimetria acentuada. Logo, pode-se assumir que as distribuições dos dados médios horários registrados eram aproximadamente normais (Little & Hills, 1978).

Avaliando a dispersão dos dados listados na Tabela 3.2 com base na classificação de coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick & Nielsen (1980), verificou-se que, para todos os dados médios horários ( $t_{bs}$ , UR, ITU e H), os valores de CV foram inferiores a 0,12, caracterizando condição de baixa dispersão. Os baixos valores de CV obtidos também são um indicativo de que as variáveis tinham distribuição aproximadamente uniforme. Estes resultados corroboram com os descritos por Andrade (2021), que avaliou um sistema CB fechado na mesma região onde este estudo foi realizado, e obteve valores de CV inferiores a 0,12.

Considerando a faixa termoneutra para bovinos leiteiros em lactação ( $4,0 \leq t_{bs} < 24,0$  °C – Tabela 3.1), observa-se que, em todos os períodos avaliados, os níveis médios horários de  $t_{bs}$  estiveram dentro da faixa considerada adequada para a espécie (Tabela 3.2). Mesmo no período mais quente do dia, os valores de  $t_{bs}$  registrados no interior da instalação foram inferiores ao LSC e, portanto, não caracterizaram situação de desconforto térmico.

Com exceção do período tarde (Tabela 3.2), observou-se que foram obtidos níveis médios horários de UR acima do limiar superior de conforto térmico recomendado para bovinos leiteiros em lactação ( $30,0 \leq UR < 75,0\%$  – Tabela 3.1). Todavia, infere-se que a ocorrência de elevados valores de UR durante todo o período experimental de inverno não prejudicou o desempenho produtivo dos animais alojados, uma vez que os níveis médios de  $t_{bs}$  mantiveram-se abaixo da temperatura considerada crítica para bovinos leiteiros em lactação ( $24,0^{\circ}\text{C}$  – Tabela 3.1).

Em relação ao ITU, por meio da Tabela 3.2 verificou-se que os valores médios estiveram dentro da faixa de conforto térmico estabelecida neste estudo para bovinos leiteiros em lactação ( $46,0 \leq ITU < 74,0$  – Tabela 3.1) em todos os períodos avaliados. Mesmo no período tarde, em que foram registrados os valores mais elevados de  $t_{bs}$ , a combinação destes com baixos valores de UR fez com que fossem obtidos valores de ITU abaixo de 74,0, caracterizando situação de

conforto térmico. Para a H, também foram obtidos valores médios horários dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação ( $8,0 \leq H < 62,0 \text{ kJ}\cdot\text{kg de ar seco}^{-1}$  – Tabela 3.1).

A partir de uma análise global de todas as variáveis estudadas ( $t_{bs}$ , UR, ITU e H), pode-se dizer que o ambiente térmico no interior do *Compost Barn* em estudo esteve dentro das faixas consideradas adequadas para a produção de bovinos de leite e, por este motivo, o gasto de energia para ativação dos mecanismos de dissipação de calor foi mínimo durante praticamente todo o período experimental de inverno.

Os métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas experimentais ajustados para as variáveis e índices do ambiente térmico avaliados durante o período experimental de inverno estão listados na Tabela 3.3.

Os melhores ajustes de semivariogramas experimentais foram obtidos utilizando os modelos esférico e exponencial que, conforme Webster & Oliver (2007), são os mais frequentemente utilizados em geoestatística. Com base nos dados das validações cruzadas (Tabela 3.3), verificou-se que os ajustes obtidos são considerados adequados, haja vista que foram obtidos valores de  $E_M$  e  $E_R$  próximos de zero ( $< 0,0100$ ), bem como valores de  $DP_R$  muito próximos de um, conforme recomendado por Isaaks & Srivastava (1989).

Dentre os parâmetros da geoestatística, um dos principais é o efeito pepita ( $C_0$ ), que se refere a variabilidade não explicada, considerando a distância entre pontos amostrados (Ferraz et al., 2017a). Para as variáveis e índices avaliados (Tabela 3.3), os valores de  $C_0$  foram majoritariamente baixos (próximos ou iguais a 0,0000), indicativo de que as variáveis e índices avaliados apresentam baixa variabilidade não explicada, e que os semivariogramas ajustados não possuem descontinuidade.

Por outro lado, como o tipo de descontinuidade representado pelo  $C_0$  pode ser atribuído a diversos fatores, tais como erros de coletas e/ou análises, variações locais etc., e não é possível quantificar a contribuição de cada fator, é importante que sejam utilizadas outras formas de avaliação do  $C_0$  (Trangmar et al., 1986). Uma destas formas é utilizar o Grau de Dependência Espacial (GDE) e expressar  $C_0$  em relação ao patamar ( $C_0 + C_1$ ), sendo possível realizar comparações, por meio da classificação de Cambardella et al. (1994).

Tabela 3.3. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para temperatura de bulbo seco ( $t_{bs}$ ), umidade relativa (UR), Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia Específica do ar (H).

| Variável | Período | Método | Modelo      | $C_0$  | $C_1$  | $C_0 + C_1$ | $a$     | $a'$    | GDE    | $E_M$   | $DP_M$ | $E_R$   | $DP_R$ |
|----------|---------|--------|-------------|--------|--------|-------------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| $t_{bs}$ | Mad.    | OLS    | Esférico    | 0,0052 | 0,0371 | 0,0423      | 6,6380  | 6,6380  | 0,1229 | -0,0001 | 0,2274 | -0,0002 | 1,1110 |
|          | Manhã   | OLS    | Esférico    | 0,0097 | 0,0819 | 0,0916      | 5,8736  | 5,8736  | 0,1059 | 0,0000  | 0,2927 | 0,0001  | 0,9628 |
|          | Tarde   | REML   | Esférico    | 0,0180 | 0,2166 | 0,2346      | 40,6683 | 40,6683 | 0,0767 | 0,0048  | 0,2517 | 0,0094  | 1,0209 |
|          | Noite   | OLS    | Esférico    | 0,0056 | 0,0459 | 0,0515      | 5,0819  | 6,0819  | 0,1087 | 0,0000  | 0,2298 | 0,0000  | 1,0098 |
| UR       | Mad.    | OLS    | Esférico    | 0,1528 | 1,3156 | 1,4684      | 5,4654  | 5,4654  | 0,1041 | -0,0003 | 1,2314 | -0,0001 | 1,0084 |
|          | Manhã   | OLS    | Esférico    | 0,5867 | 3,9106 | 4,4973      | 5,1147  | 5,1147  | 0,1305 | -0,0002 | 2,1239 | -0,0001 | 0,9929 |
|          | Tarde   | OLS    | Esférico    | 0,0000 | 9,4850 | 9,4850      | 5,0397  | 5,0397  | 0,0000 | -0,0004 | 3,0743 | -0,0001 | 0,9895 |
|          | Noite   | OLS    | Esférico    | 0,3491 | 4,5540 | 4,9031      | 5,2721  | 5,2721  | 0,0712 | -0,0004 | 2,2516 | -0,0001 | 1,0085 |
| ITU      | Mad.    | OLS    | Esférico    | 0,0003 | 0,1718 | 0,1721      | 5,8403  | 5,8403  | 0,0017 | -0,0001 | 0,4225 | -0,0001 | 1,0146 |
|          | Manhã   | OLS    | Esférico    | 0,0000 | 0,2418 | 0,2418      | 5,0215  | 5,0215  | 0,0000 | 0,0000  | 0,4939 | 0,0000  | 0,9957 |
|          | Tarde   | OLS    | Esférico    | 0,0002 | 0,1731 | 0,1733      | 5,8705  | 5,8706  | 0,0012 | -0,0001 | 0,4892 | -0,0001 | 1,1706 |
|          | Noite   | OLS    | Esférico    | 0,0075 | 0,1565 | 0,1640      | 5,3975  | 5,3975  | 0,0457 | 0,0000  | 0,4047 | 0,0000  | 0,9917 |
| H        | Mad.    | OLS    | Esférico    | 0,0004 | 0,3014 | 0,3018      | 5,6248  | 5,6248  | 0,0013 | -0,0002 | 0,5615 | -0,0002 | 1,0160 |
|          | Manhã   | OLS    | Exponencial | 0,0000 | 0,5309 | 0,5309      | 5,0008  | 14,9812 | 0,0000 | -0,0056 | 0,6372 | -0,0046 | 1,0423 |
|          | Tarde   | OLS    | Esférico    | 0,0000 | 1,2355 | 1,2355      | 6,5328  | 6,5328  | 0,0000 | -0,0033 | 1,1182 | -0,0015 | 1,0121 |
|          | Noite   | OLS    | Esférico    | 0,0209 | 0,5211 | 0,5420      | 5,4957  | 5,4957  | 0,0386 | -0,0002 | 0,7542 | -0,0001 | 1,0173 |

\* Mad. – Madrugada;  $C_0$  – efeito pepita;  $C_1$  – contribuição;  $C_0 + C_1$  – patamar;  $a$  – alcance;  $a'$  – alcance prático; GDE – grau de dependência espacial;  $E_M$  – erro médio;  $DP_M$  – desvio padrão do erro médio;  $E_R$  – erro reduzido;  $DP_R$  – desvio padrão do erro reduzido; OLS – Método dos Quadrados Mínimos Ordinários; e REML – Método da Máxima Verossimilhança Restrita.

Ao ser utilizado o GDE para avaliar a contribuição da variabilidade não explicada na composição do patamar (Tabela 3.3), verificou-se que os valores de GDE obtidos foram inferiores a 0,2500, caracterizando ocorrência de forte dependência espacial. Os valores de GDE mais elevados foram observados para as variáveis  $t_{bs}$  (madrugada) e UR (manhã), em que foram obtidos valores iguais a 0,1229 e 0,1305, respectivamente. Portanto, pode-se concluir que os resultados obtidos com o uso da krigagem ordinária são representativos das variáveis de interesse, uma vez que baixas contribuições do efeito pepita para o patamar retornam resultados melhores com o uso das técnicas de interpolação por krigagem ordinária (Curi et al., 2017).

Outro parâmetro de elevada importância é o alcance ( $a$ ), que representa a distância de influência de uma observação, separando amostras correlacionadas entre si (estruturadas) de amostras independentes (aleatórias) (Andriotti, 2003). Em todos os casos avaliados neste estudo, os valores de  $a$  obtidos foram superiores a menor distância entre pontos amostrados (4,5 m) sendo observada ocorrência de dependência espacial (Tabela 3.3). Os menores valores de  $a$  foram observados para UR (tarde,  $a = 5,0397$  m), ITU (manhã,  $a = 5,0215$  m) e H (manhã,  $a = 5,0008$  m). Por meio da análise dos valores de  $a$ , torna-se evidente que a distância entre pontos de amostragem foi adequada.

Verificada a ocorrência de dependência espacial forte para todas as variáveis e índices de interesse (Tabela 3.3), foi possível utilizar a krigagem ordinária para obtenção dos dados em pontos não amostrados. A partir dos dados krigados, foram gerados mapas de distribuição espacial, que, conforme Ferraz et al. (2017b), tornam possível identificar regiões com maiores e menores níveis das variáveis e índices estudados. Na Figura 3.6 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial da variável temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) durante o período experimental de inverno, nos períodos madrugada, manhã, tarde e noite.

Por meio da Figura 3.6, observou-se que, em todos os períodos avaliados, houve ocorrência de baixa variabilidade espacial dos valores médios de  $t_{bs}$ , e foram observados valores de temperatura próximos aos registrados no exterior da instalação (abrigo meteorológico). Nos períodos madrugada, manhã e noite, foram obtidas amplitudes de variação baixas (0,9, 1,4 e 0,9 °C, respectivamente). No período tarde, a amplitude de  $t_{bs}$  foi ligeiramente superior (2,1 °C), com ocorrência de valores médios entre 21,1 e 23,2 °C.

Mesmo que observadas baixas amplitudes de variação, observou-se que houve a formação de um gradiente de  $t_{bs}$  ao longo da instalação, com menores e maiores valores de  $t_{bs}$  sempre ocorrendo em regiões próximas as faces Sudeste e Noroeste, respectivamente (Figura 3.6). A ocorrência de uma região com temperaturas médias mais elevadas é um indício de que

o sistema de ventilação utilizado não estava sendo efetivo em assegurar condições térmicas homogêneas, mesmo que durante a estação mais fria do ano (inverno).

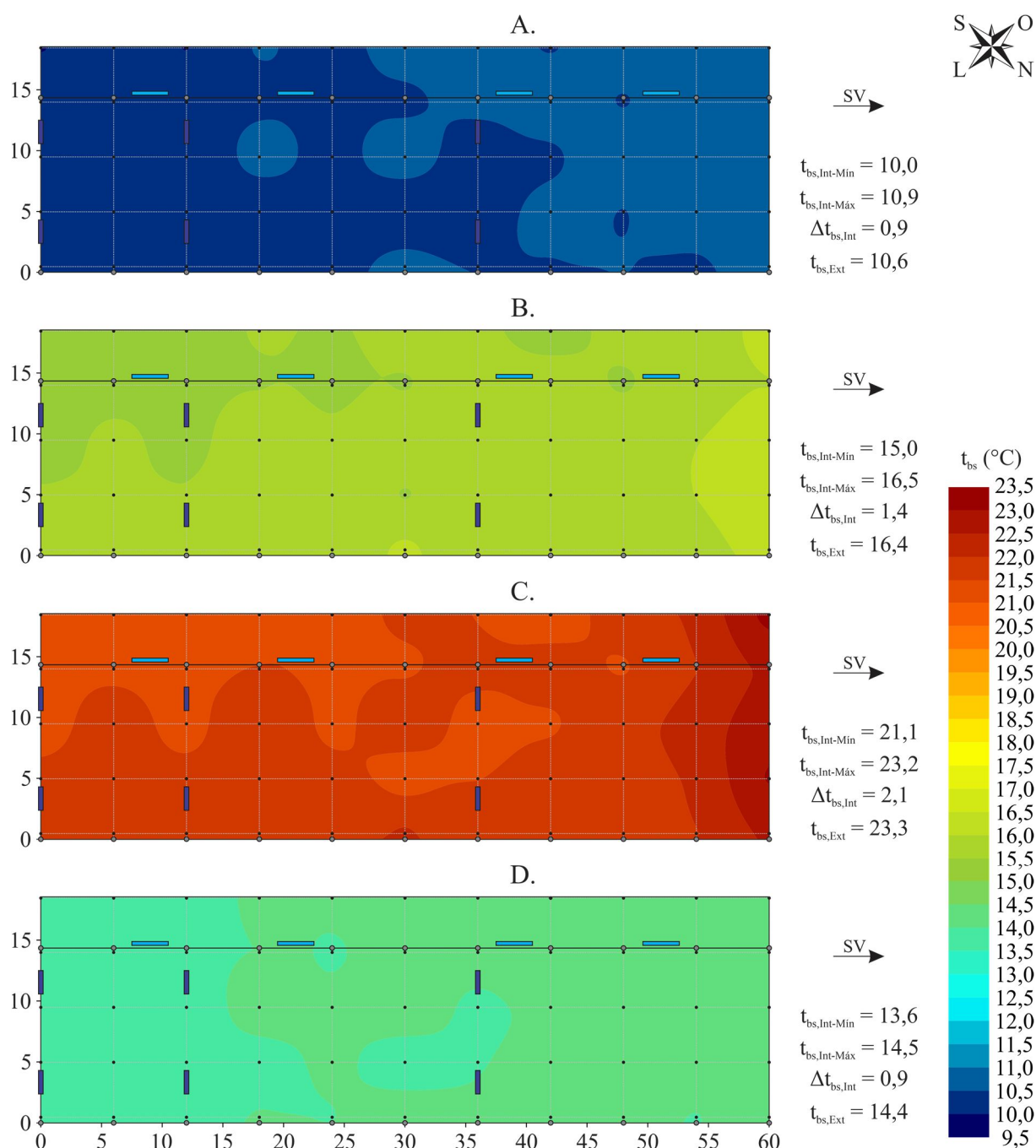


Figura 3.6. Distribuição espacial de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , em  $^\circ\text{C}$ ): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D). \*SV – sentido da ventilação;  $t_{bs,Int-Min}$  – temperatura de bulbo seco do ar interna mínima;  $t_{bs,Int-Máx}$  – temperatura de bulbo seco do ar interna máxima;  $\Delta t_{bs,Int}$  – variação da temperatura de bulbo seco do ar interna;  $t_{bs,Ext}$  – temperatura de bulbo seco do ar externa média; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Para ventiladores mecânicos de baixo volume e alta rotação (*LVHS*), como os utilizados no sistema *CBAVP*, a distância entre linhas de ventiladores instaladas na longitudinal deve ser de 12,0 a 18,0 m, sendo recomendado adotar 12,0 m (Damasceno, 2020). Próximo da face Sudeste da instalação em estudo estavam instalados quatro ventiladores (cotas 0,0 e 12,0 m, de Sudeste a Noroeste), que permaneciam ligados  $24 \text{ h} \cdot \text{dia}^{-1}$  e, por sua vez, possibilitaram reduzir a  $t_{bs}$  em suas zonas de atuação (Black et al., 2013; Oliveira et al., 2019). Todavia, em todo o restante da área da instalação estavam presentes apenas mais dois ventiladores (cota 36,0 m, de Sudeste a Noroeste), evidencia de que a distância entre segunda, terceira linha e extremidade Noroeste (24,0 m) era superior ao recomendado. Deste modo, infere-se que número e disposição dos ventiladores utilizados não foram satisfatórios reduzir os valores médios de  $t_{bs}$ , notadamente em locais mais distantes, como na região próxima da face Noroeste da instalação.

Especificamente em relação a região próxima da face Noroeste da instalação em estudo, a situação mais notória ocorreu no período da tarde, no qual foi observada incidência de radiação solar direta dentro da instalação e, como consequência, valores médios de  $t_{bs}$  mais elevados ( $23,2 \text{ }^\circ\text{C}$  – Figura 3.6C). A incidência de radiação solar direta nesta região ocorreu devido a dois fatores: orientação da instalação e ausência de fechamento da parte superior do oitão da face Noroeste. A instalação avaliada era orientada no sentido Sudeste-Noroeste e, por este motivo, algumas regiões da construção estavam propensas a receberem incidência direta de radiação solar em algumas horas do dia durante o inverno (Damasceno, 2020), conforme constatado por meio dos mapas de distribuição espacial de  $t_{bs}$  (Figura 3.6C). Em casos como este, recomenda-se que sejam instalados dispositivos de fechamento na parte superior dos oitões, próximo ao telhado, para evitar e/ou minimizar a incidência de radiação solar direta no interior da instalação (Abreu & Abreu, 2000). Por outro lado, como se tratava apenas de uma pequena fração da área, recomenda-se que sejam aplicadas modificações secundárias, como instalação das citadas estruturas de fechamento ou sombrites da parte superior do oitão, que funcionarão como bloqueios à entrada de radiação solar e, portanto, possibilitarão reduzir os níveis médios de  $t_{bs}$  nesta região, conforme Baêta & Souza (2010).

Considerando a faixa de temperatura termoneutra para bovinos leiteiros em lactação que foi estabelecida neste estudo ( $4,0 \leq t_{bs} < 24,0 \text{ }^\circ\text{C}$  – Tabela 3.1), por meio da Figura 3.6 verificou-se que os valores médios horários de  $t_{bs}$  registrados durante o período de inverno estiveram dentro da faixa considerada ideal. Os níveis médios mais elevados de  $t_{bs}$  foram registrados no horário tarde,  $23,2 \text{ }^\circ\text{C}$  (Figura 3.6C), e ocorreram em uma região próxima da face Noroeste da instalação, que, conforme já mencionado, recebia incidência de radiação solar direta.

Mesmo que na face Noroeste da instalação avaliada neste estudo não tenham sido registrados valores médios de  $t_{bs}$  acima do LSC, esta região pode ser preterida pelos animais no período mais quente do dia (tarde). Quando são registrados valores mais elevados de  $t_{bs}$  em um determinado local, os animais tendem a rejeitar a região de sua ocorrência e se agrupar em locais com níveis mais amenos e/ou maiores velocidades do ar. Com isso, há tendência ao aumento do desconforto térmico, risco de acidentes por pisoteio de tetos e cauda, bem como compactação e piora da qualidade da cama, conforme Damasceno (2020).

Certamente, a temperatura do ar exerce elevada influência sobre o conforto térmico e desempenho produtivo de bovinos leiteiros, mas essa variável deve ser sempre avaliada em associação com a umidade relativa do ar (UR) (Nääs, 1989; Baêta & Souza, 2010). Na Figura 3.7 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial dos valores médios horários (madrugada, manhã, tarde e noite) de UR registrados durante o período experimental de inverno.

Por meio da Figura 3.7, pode-se observar que os mapas de distribuição espacial de UR denotaram maior variabilidade espacial, estando de acordo com o que foi observado em outros estudos conduzidos em sistemas *CB* (Oliveira et al., 2019; Andrade, 2021), que também observaram ocorrência de elevadas amplitudes de variação de UR. Nos períodos madrugada, manhã, tarde e noite, foram observadas amplitudes de variação de 6,2, 10,1, 12,4 e 10,4%, respectivamente, indícios de que a distribuição de UR no interior da instalação é heterogênea.

No período madrugada (Figura 3.7A), foi possível observar que ocorreram condições de maior homogeneidade ( $93,6 < UR \leq 99,7\%$ ), ao passo que no período tarde (Figura 3.7C) a distribuição de UR foi mais heterogênea ( $54,2 < UR \leq 66,6\%$ ). Nos períodos diurnos (manhã e tarde), observou-se tendência à ocorrência de menores níveis de UR nas regiões periféricas da instalação, especialmente próximo da face Noroeste (Figuras 3.7B e 3.7C). Nestes dois períodos, pode-se afirmar que o registro de valores mais baixos de UR se deve a entrada de radiação solar direta e a influência das condições ambientais externas, que, portanto, contribuíram para a redução da UR no ambiente interno.

No período noite (18h00min às 23h59min, Figura 3.7D), foi observado aumento da UR, possivelmente devido a influência das condições ambientais externas e da cama. Na madrugada (00h00min às 05h59min, Figura 3.7A), manteve-se a tendência de aumento da UR e observou-se distribuição mais uniforme ( $\Delta UR_{Int} = 6,2\%$ , menor variação entre períodos).

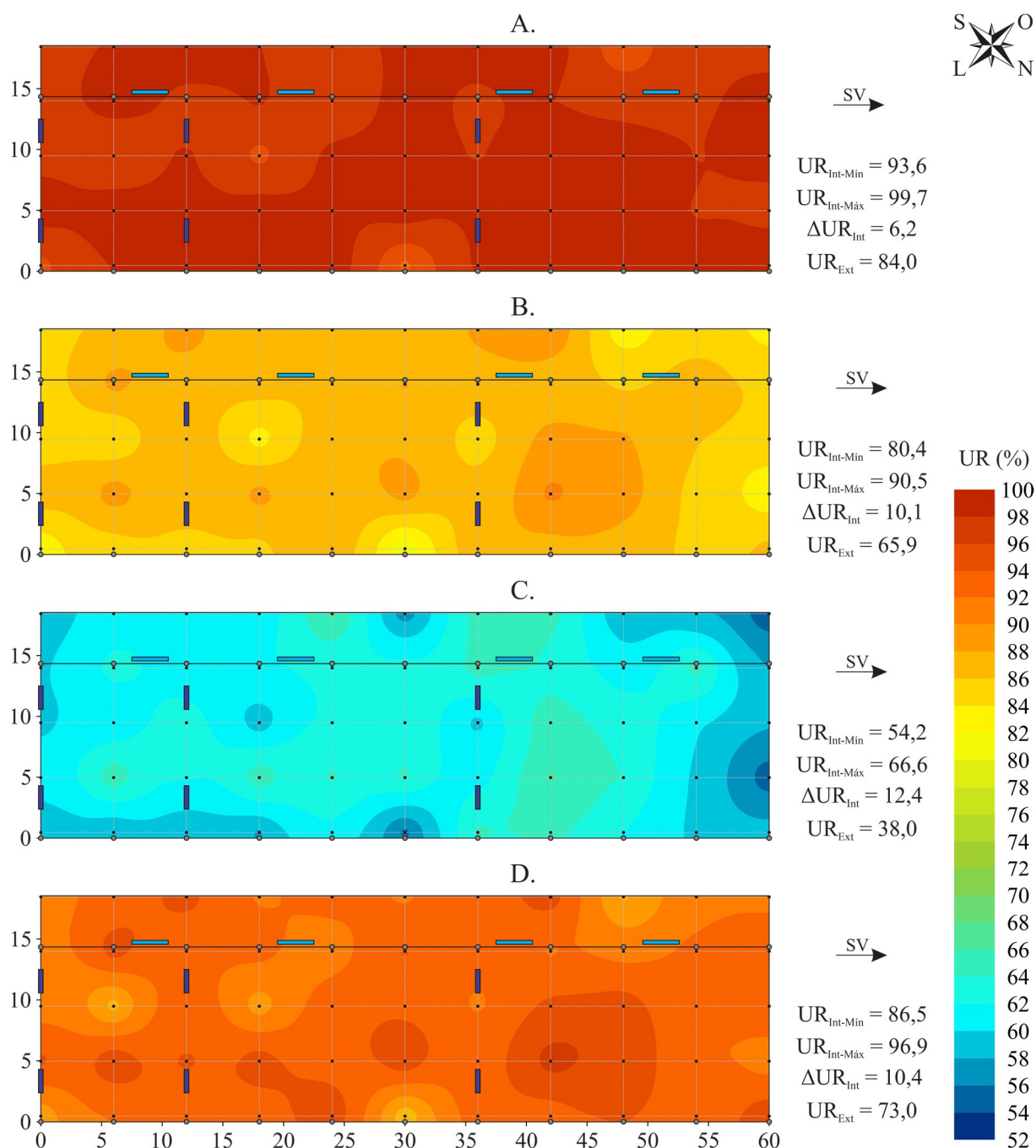


Figura 3.7. Distribuição espacial de umidade relativa do ar (UR, em %): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D). \*SV – sentido da ventilação; UR<sub>Int-Min</sub> – umidade relativa do ar interna mínima; UR<sub>Int-Máx</sub> – umidade relativa do ar interna máxima;  $\Delta$ UR<sub>Int</sub> – variação da umidade relativa do ar interna; UR<sub>Ext</sub> – umidade relativa do ar externa média; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Considerando a faixa de UR estabelecida neste estudo como termoneutra para bovinos leiteiros em lactação ( $30,0 \leq UR < 75,0\%$  – Tabela 3.1), pode-se observar que os níveis médios de UR no interior do sistema avaliado foram superiores ao LSU na maioria dos períodos (madrugada, manhã e noite), estando abaixo de 75,0% apenas no horário tarde (Figura 3.7).

Haja vista que no sistema avaliado não era feito uso de SRAE, os elevados níveis de UR podem representar um problema para o processo de semi-compostagem e manejo da cama, saúde dos animais e qualidade do leite (Damasceno, 2020; Leso et al., 2020). De fato, neste tipo de sistema existe uma tendência de ocorrerem elevados níveis de UR no ambiente interno, como resultado do vapor-d'água liberado durante o processo de semi-compostagem, da evaporação e derrame de água de bebedouros, e da respiração e dejetos dos animais, conforme já observado por Damasceno et al. (2019) e Andrade (2021). Por este motivo, é necessário dar maior atenção ao manejo da cama, com realização de mais operações de revolvimento, adição e incorporação de material de cama seco, como forma de reduzir a umidade da cama e manter a área de descanso seca, higiênica e confortável para os animais alojados (Leso et al., 2020).

Os mapas de distribuição espacial de ITU estão ilustrados na Figura 3.8. Conforme esperado, as distribuições espaciais dos valores médios de ITU tiveram comportamentos semelhantes aos observados para a  $t_{bs}$ , com ocorrência de baixa variabilidade espacial. As amplitudes de variação registradas foram baixas nos quatro períodos avaliados (1,6, 2,3, 2,4 e 1,6, nos períodos madrugada, manhã, tarde e noite, respectivamente).

Do mesmo modo que para  $t_{bs}$  (Figura 3.6), para ITU foi observado que nos períodos com maior amplitude de variação (manhã e tarde) ocorreu a formação de pequenos gradientes ao longo da instalação, com valores mais baixos observados próximo da face Sudeste e mais altos na região Noroeste (Figura 3.8). Por meio da Figura 3.8, pode-se inferir que o sistema de ventilação instalado no local não estava sendo efetivo em promover condições homogêneas de conforto térmico. Conjuntamente, a ausência de estruturas de fechamento na região superior da face Noroeste da instalação fez com que ocorresse entrada de radiação solar direta, elevando os valores de  $t_{bs}$  e, conseqüentemente, de ITU.

Em todos os períodos avaliados (Figura 3.8), os valores de ITU obtidos estiveram dentro da faixa de termoneutralidade para bovinos leiteiros em lactação que foi estabelecida neste estudo ( $46,0 \leq ITU < 74,0$  – Tabela 3.1), algo que já era esperado para a estação do ano e região climática em estudo. A situação mais próxima do limite superior de ITU ocorreu no período tarde, em que foi observada a ocorrência de uma região com  $ITU \geq 69,0$ .

A obtenção de condições de ITU consideradas como de conforto térmico deve-se aos baixos valores de  $t_{bs}$  registrados no interior da instalação (Figura 3.6), comuns no inverno. Por outro lado, não se pode esquecer dos elevados níveis de UR observados nos períodos madrugada, manhã e noite (Figura 3.7), que, apesar de não terem configurado estresse térmico, podem representar um problema para o manejo da cama, saúde do rebanho e qualidade do leite.

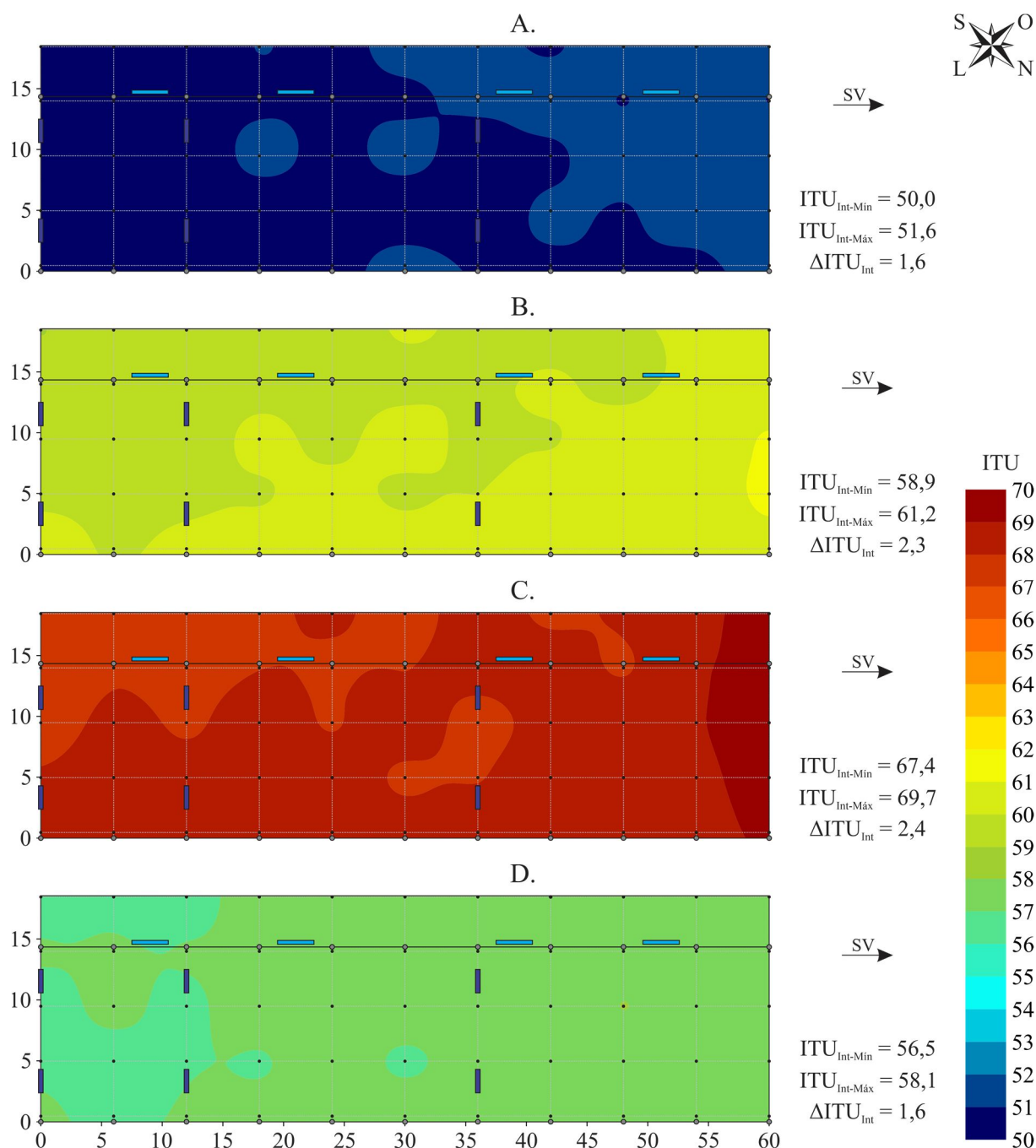


Figura 3.8. Distribuição espacial do Índice de Temperatura e Umidade (ITU): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D). \*SV – sentido da ventilação;  $ITU_{Int-Min}$  – Índice de Temperatura e Umidade interno mínimo;  $ITU_{Int-Max}$  – Índice de Temperatura e Umidade interno máximo;  $\Delta ITU_{Int}$  – variação do Índice de Temperatura e Umidade interno; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Os resultados de ITU alcançados neste trabalho (Figura 3.8) corroboram com os observados por Andrade (2021), que avaliou as variáveis microclimáticas em um sistema *CB* fechado com ventilação em modo túnel associada SRAE, na mesma região climática deste

estudo. No estudo supracitado, foi observado que os níveis médios de ITU mais elevados ocorreram no período tarde, mas foram sempre inferiores a 74,0, estando dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação. Com base nos resultados obtidos no presente estudo, pode-se concluir que nesta região não é necessário fazer uso de SRAE durante o período de inverno, uma vez que as condições observadas em sistemas *CB* abertos já atendem às necessidades térmicas dos animais.

Estudos de caracterização do conforto térmico em sistemas *CB* abertos com ventilação mecânica (*LVHS*) também foram conduzidos no Sul de Minas Gerais, por Mota et al. (2019). Durante o período de inverno, os autores obtiveram valores médios de ITU de 64,6 e 66,2, nos períodos manhã e tarde, respectivamente (com ventiladores ligados). Os resultados obtidos no presente estudo também estão de acordo com os reportados pelos autores.

Os mapas de distribuição espacial da *H* no interior da instalação (madrugada, manhã, tarde e noite) estão ilustrados na Figura 3.9.

Por meio da Figura 3.9, verificou-se que as distribuições de *H* foram relativamente uniformes, com amplitudes de variação ao longo da instalação sempre inferiores a 5,0 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>. Os valores mais elevados de *H* foram obtidos no período tarde ( $H_{\text{Int-Máx}} = 50,9$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), que também teve maior amplitude de variação ( $\Delta H_{\text{Int}} = 4,8$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>). Por outro lado, distribuições mais suavizadas foram observadas nos períodos madrugada e noite, em que foram obtidas amplitudes de variação mais baixas (2,6 e 3,5 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>, respectivamente).

Em todos os períodos avaliados (Figura 3.9), observou-se que ocorreu a formação de um pequeno gradiente de *H* ao longo da instalação, com menores níveis nas proximidades da face Sudeste, e maiores na região Noroeste. A ocorrência de níveis de *H* mais elevados nas proximidades da face Noroeste deve-se a incidência direta de radiação solar nesta região da instalação, que, conforme já amplamente discutido, causou a elevação dos valores médios de  $t_{\text{bs}}$  (Figura 3.6) e, como consequência direta, de *H* (Figura 3.9).

Com base nos mapas de distribuição espacial de *H* (Figura 3.9), verificou-se que os níveis médios horários de *H* obtidos no interior do sistema durante o período experimental de inverno estavam dentro da faixa considerada adequada para bovinos leiteiros em lactação ( $8,0 \leq \text{ITU} < 62,0$  kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup> – Tabela 3.1). Portanto, pode-se inferir que a quantidade de calor presente no interior da instalação durante este período não representou um problema do ponto de vista de conforto térmico.

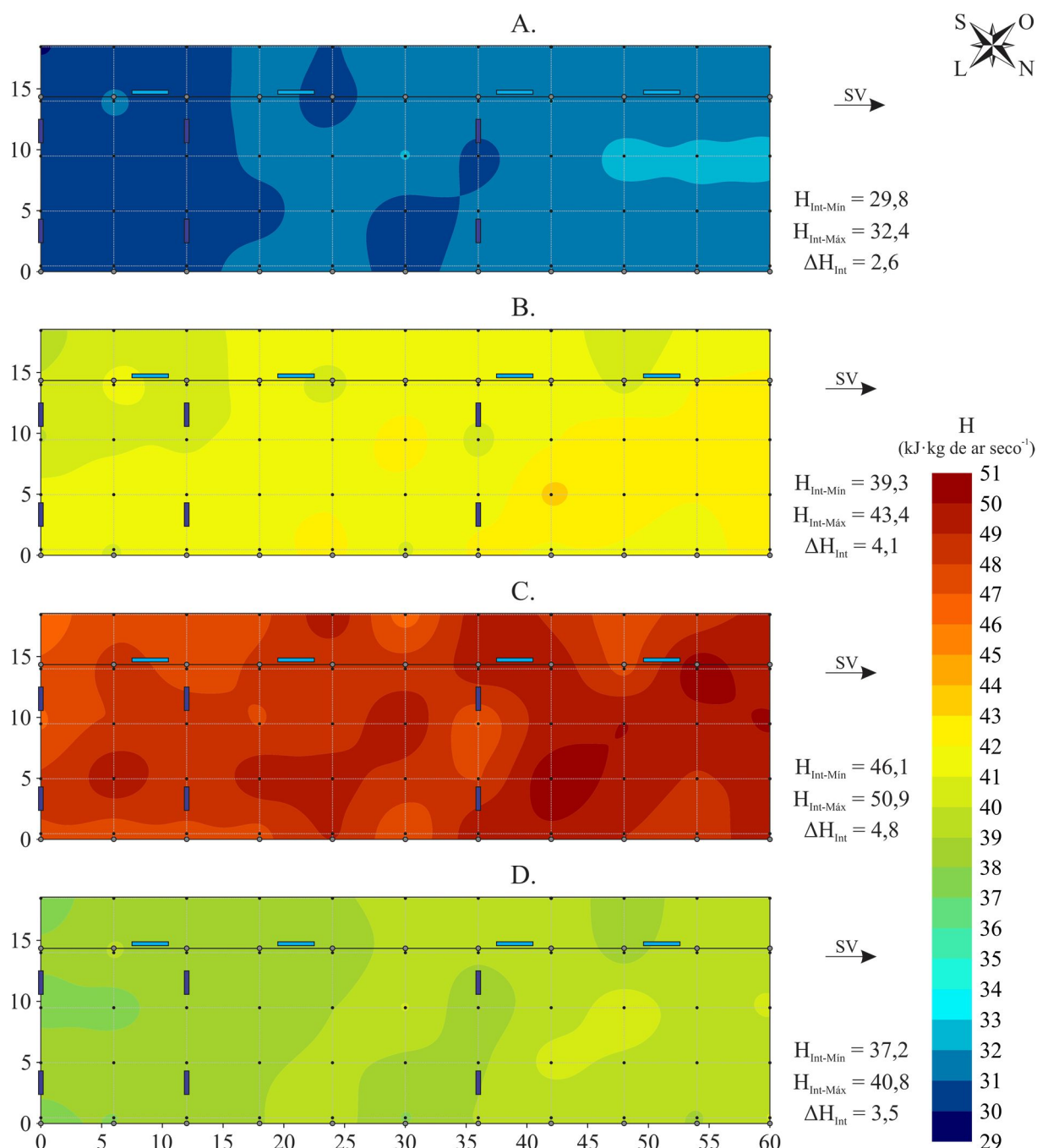


Figura 3.9. Distribuição espacial da Entalpia Específica do Ar ( $H$ , em  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ): períodos madrugada – 00h00min às 05h59min (A); manhã – 06h00min às 11h59min (B); tarde – 12h00min às 17h59min (C); e noite – 18h00min às 23h59min (D). \*SV – sentido da ventilação;  $H_{\text{Int-Min}}$  – Entalpia Específica do Ar interna mínima;  $H_{\text{Int-Max}}$  – Entalpia Específica do Ar interna máxima;  $\Delta H_{\text{Int}}$  – variação da Entalpia Específica do Ar interna; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Os resultados de  $H$  obtidos neste trabalho (Figura 3.9) corroboram com os descritos por Andrade (2021), que avaliou as condições térmicas durante o período de inverno no interior de um sistema *CB* fechado. A autora observou a ocorrência de menores valores de  $H$  no período madrugada ( $32,6 \pm 0,7 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) e maiores valores no período tarde ( $53,0 \pm 0,7 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

de ar seco<sup>-1</sup>). No estudo realizado pela citada autora, a ocorrência de valores mais elevados de H no período tarde foi devido aos elevados níveis de UR registrados ( $76,6 \pm 2,4\%$ ), justificados pelo uso do SRAE.

### 3.4 CONCLUSÕES

A análise temporal dos dados do microambiente permitiu verificar que, durante todo o período de estudo, a temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) média manteve-se dentro da faixa de conforto térmico ( $4,0 \leq t_{bs} < 24,0$  °C), apesar da  $t_{bs}$  máxima absoluta atingir valores fora da zona de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação em algum horário, na maioria dos dias. Verificou-se também que a umidade relativa do ar (UR) média esteve acima da faixa de conforto térmico ( $30,0 \leq UR < 75,0\%$ ) na maioria dos dias (das 00h00min às 10h00min e das 17h00min às 24h00min). Porém, por meio do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e da Entalpia Específica do Ar (H), que consideram a combinação destes dois fatores, foi indicada ocorrência de condições adequadas de conforto térmico em todos os horários avaliados.

A aplicação das técnicas de geoestatística permitiu verificar e caracterizar a ocorrência de dependência espacial das variáveis avaliadas. Para todas as variáveis, foi observada ocorrência de forte dependência espacial, possibilitando aplicar técnicas de interpolação por krigagem ordinária e gerar mapas de distribuição espacial.

Por meio dos mapas gerados, foi possível observar que as variáveis ( $t_{bs}$  e UR) e os índices estudados (ITU e H) apresentavam variabilidade espacial. As variáveis  $t_{bs}$  e UR tiveram distribuição variável ao longo da instalação, notadamente nos períodos manhã e tarde, mas a sua combinação retornou mapas de ITU e H com distribuição dentro da faixa de conforto térmico. Os níveis mais elevados de  $t_{bs}$ , ITU e H foram registrados no período tarde, na região Noroeste da instalação ( $t_{bs} = 23,2$  °C, ITU = 69,7 e H = 50,9 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), que recebia incidência de radiação solar direta, ao passo que os valores mais baixos foram registrados no período madrugada, nas áreas próximas aos ventiladores ( $t_{bs} = 10,0$  °C, ITU = 50,0 e H = 29,8 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>).

### REFERÊNCIAS

ABREU, P.G.; ABREU, V.M.N. **Ventilação na avicultura de corte**. 1.ed. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2000. 50p.

AKYUZ, A.; BOYACI, S.; CAYLI, A. Determination of critical period for dairy cows using temperature humidity index. **Journal of Animal and Veterinary Advances**, v.9, p.1824–1827, 2010.

ANDRADE, R.R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas compost barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Viçosa.

ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; FREITAS, L.C.S.R.; FERREIRA, C.F.S.; BARBARI, M.; BAPTISTA, F.J.F.; COELHO, D.J.R. Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, v.23, p.103111, 2021. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103111.

ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. 1.ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003. 165p.

BAÊTA, F.C.; SOUZA, C.F. **Ambiência em edificações rurais: Conforto térmico**. 2.ed. Viçosa: Editora UFV, 2010. 269p.

BERMAN, A.; FOLMAN, Y.; KAIM, M.; MAMEN, M.; HERZ, Z.; WOLFENSON, D.; ARIELI, A.; GRABER, Y. Upper critical temperatures and forced ventilation effects for high-yielding dairy cows in a subtropical climate. **Journal of Dairy Science**, v.68, p.1488–1495, 1985. DOI: 10.3168/JDS.S0022-0302(85)80987-5.

BEWLEY, J.M.; ROBERTSON, L.M.; ECKELKAMP, E.A. A 100-year review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, v.100, p.10418–10431, 2017. DOI: 10.3168/JDS.2017-13251.

BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; BEWLEY, J.M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v.96, p.8060–8074, 2013. DOI: 10.3168/jds.2013-6778.

BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; NEWMAN, M.C.; AKERS, K.A.; WOOD, C.L.; MCQUERRY, K.J.; BEWLEY, J.M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, v.97, p.2669–2679, 2014. DOI: 10.3168/JDS.2013-6779.

BORGES, G.; MIRANDA, K.O. DA S.; RODRIGUES, V.C.; RISI, N. Uso da geoestatística para avaliar a captação automática dos níveis de pressão sonora em instalações de creche para suínos. **Engenharia Agrícola**, v.30, p.377–385, 2010. DOI: 10.1590/S0100-69162010000300002.

BUCKLIN, R.A.; TURNER, L.W.; BEEDE, D.K.; BRAY, D.R.; HEMKEN, R.W. Methods to relieve heat stress for dairy cows in hot, humid climates. **Applied Engineering in Agriculture**, v.7, p.241–247, 1991. DOI: 10.13031/2013.26218.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777–783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501–1511, 1994. DOI: 10.2136/SSSAJ1994.03615995005800050033X.

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, p.149–161, 2021. DOI: 10.1007/s00484-020-02022-8.

CORTEZ, L.A.B.; MAGALHÃES, P.S.G. **Introdução à Engenharia Agrícola**. 1.ed. Campinas: Unicamp, 1993. 393p.

CURI, T.M.R.C.; CONTI, D.; VERCELLINO, R.A.; MASSARI, J.M.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R. Positioning of sensors for control of ventilation systems in broiler houses: a case study. **Scientia Agricola**, v.74, p.101–109, 2017. DOI: 10.1590/1678-992X-2015-0369.

DAMASCENO, F.A. **Compost Barn como uma alternativa para a pecuária leiteira**. 1.ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396p.

DAMASCENO, F.A.; OLIVEIRA, C.E.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; BARBARI, M.; FERRAZ, P.F.P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v.17, p.385–395, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.115.

ENDRES, M.; LOBECK, K.; JANNI, K.; GODDEN, S.; FETROW, J. Barn environment study. In: **Minnesota Dairy Health Conference**. St. Paul: University of Minnesota Press, 2011. p.47–56. .

FARIA, F.F.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MATARAZZO, S.V. Variabilidade espacial do microclima de um galpão utilizado para confinamento de bovinos de leite. **Ciência Rural**, v.38, p.2498–2505, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000900013.

FERRAZ, G.A.S.; SILVA, F.M.; OLIVEIRA, M.S.; CUSTÓDIO, A.A.P.; FERRAZ, P.F.P. Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agrônômica**, v.48, p.91, 2017a. DOI: 10.5935/1806-6690.20170009.

FERRAZ, P.F.P.; YANAGI JUNIOR, T.; FERRAZ, G.A.S.; DAMASCENO, F.A. Distribuição espacial do índice de temperatura do globo e umidade em galpão de frangos na primeira semana de vida aquecido por fornalha industrial. **Energia na Agricultura**, v.32, p.356–363, 2017b. DOI: 10.17224/EnergAgric.2017v32n4p356-363.

FERREIRA, R.A. **Maior produção com melhor ambiente para aves, suínos e bovinos**. 3.ed. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2016. 528p.

FREITAS, L.C.S.R.; TINÔCO, I.F.F.; GATES, R.S.; BARBARI, M.; CÂNDIDO, M.G.L.; TOLEDO, J. V. Development and validation of a data logger for thermal characterization in laying hen facilities. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.787–793, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p787-793.

GALAMA, P.J.; OUWELTJES, W.; ENDRES, M.I.; SPRECHER, J.R.; LESO, L.; KUIPERS, A.; KLOPČIČ, M. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.5759–5772, 2020. DOI: 10.3168/JDS.2019-17214.

GUESINE, G.D. **Sistema compost barn para bovinos leiteiros e seus reflexos nos parâmetros ambientais, desempenho e produção durante o verão em diferentes fases da lactação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Piracicaba.

IGONO, M.O.; BJOTVEDT, G.; SANFORD-CRANE, H.T. Environmental profile and critical temperature effects on milk production of Holstein cows in desert climate. **International Journal of Biometeorology**, v.36, p.77–87, 1992. DOI: 10.1007/BF01208917.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M.A.; DAMASCENO, F.A.; GALAMA, P.; TARABA, J.L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LESO, L.; CONTI, L.; ROSSI, G.; BARBARI, M. Criteria of design for deconstruction applied to dairy cows housing: A case study in Italy. **Agronomy Research**, v.16, p.794–805, 2018. DOI: 10.15159/AR.18.085.

LESO, L.; PELLEGRINI, P.; BARBARI, M. Effect of two housing systems on performance and longevity of dairy cows in Northern Italy. **Agronomy Research**, v.17, p.574–581, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.107.

LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. 1.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1978. 368p.

MADER, T.L.; DAVIS, M.S.; BROWN-BRANDL, T. Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. **Journal of Animal Science**, v.84, p.712–719, 2006. DOI: 10.2527/2006.843712X.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. 14.ed. Paris: Editions Technip, 1962. v.1 333p.

MEDEIROS, B.B.L.; MOURA, D.J. DE; MASSARI, J.M.; CURI, T.M.R. DE C.; MAIA, A.P.D.A. Uso da geoestatística na avaliação de variáveis ambientais em galpão de suínos criados em sistema “wean to finish” na fase de terminação. **Engenharia Agrícola**, v.34, p.800–811, 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000500001.

MEE, J.F.; BOYLE, L.A. Assessing whether dairy cow welfare is “better” in pasture-based than in confinement-based management systems. **New Zealand Veterinary Journal**, v.68, p.168–177, 2020. DOI: 10.1080/00480169.2020.1721034.

MOTA, V.C.; ANDRADE, E.T.; LEITE, D.F. Caracterização da variabilidade espacial dos índices de conforto animal em sistemas de confinamento Compost Barn. **PUBVET**, v.13, p.170–, 2019. DOI: 10.31533/pubvet.v13n3a276.1-14.

NÄÄS, I.A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 1989. 183p.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; VEGA, F.A.O.; TITÔCO, I.F.F.; ANDRADE, R.R. Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, p.20200384, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120200384.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, P.F.P.; NASCIMENTO, J.A.C.; FERRAZ, G.A.S.; BARBARI, M. Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and

noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, v.17, p.783–796, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.116.

PASSETTI, R.A.C.; EIRAS, C.E.; GOMES, L.C.; SANTOS, J.F.; PRADO, I.N. Intensive dairy farming systems from Holland and Brazil: SWOT analyse comparison. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.38, p.439–446, 2016. DOI: 10.4025/ACTASCIANIMSCI.V38I4.31467.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.1, p.117–126, 2007. DOI: 10.18011/bioeng2007v1n2p117-126.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J.; CRUZ, V.F.; SOUZA, S.R.L.; LIMA, K.A.O.; MENDES, A.S. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciência Rural**, v.39, p.1492–1498, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000094.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.5, p.97–105, 2017.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C.; RANKRAPE, F.; VISMARA, E.S. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, v.13, p.399–406, 2019. DOI: 10.1017/S1751731118001088.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R News**, v.1, p.14–18, 2001.

RODRIGUES, V.C.; SILVA, I.J.O.; VIEIRA, F.M.C.; NASCIMENTO, S.T. A correct enthalpy relationship as thermal comfort index for livestock. **International Journal of Biometeorology**, v.55, p.455–459, 2011. DOI: 10.1007/s00484-010-0344-y.

ROENFELDT, S. You can't afford to ignore heat stress. **Dairy Herd Management**, v.35, p.6–12, 1998.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L.; VERMA, S.B. Human and animal biometeorology. In: **Microclimate: The biological environment**. 2.ed. New York: Wiley-interscience Publication, 1983.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L.G.; SILVA, F.F.; ALVES, M.C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.108, p.1–7, 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0507-8.

SALES, F.A.; BARBOSA FILHO, J.A.D.; AQUINO, T.M.F.; BRITO, I.F.; CARVALHO, L.E. Monitoramento ambiental do perfil horizontal de um galpão para suínos, na fase de gestação, utilizando zootecnia de precisão. **Revista Científica de Produção Animal**, v.13, p.7–12, 2011. DOI: 10.15528/2176-4158/rcpa.v13n1p7-12.

SILVA, M.V.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G.L.P.; JARDIM, A.M.R.F.; BATISTA, P.H.D.; SILVA, R.A.B.; LOPES, I.; OLIVEIRA, M.E.G.; SILVA, J.L.B.; MORAES, A.S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle

in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v.94, p.102782, 2020. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2020.102782.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45–94, 1986. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60673-2.

VIEIRA, F.M.C.; SOARES, A.A.; HERBUT, P.; VISMARA, E.S.; GODYŃ, D.; SANTOS, A.C.Z. DOS; LAMBERTES, T.S.; CAETANO, W.F. Spatio-thermal variability and behaviour as bio-thermal indicators of heat stress in dairy cows in a Compost Barn: A case study. **Animals**, v.11, p.1197, 2021. DOI: 10.3390/ani11051197.

VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P.; GONZÁLEZ, A.P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v.69, p.97–105, 2010. DOI: 10.1590/S0006-87052010000500011.

WARRICK, W.A.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319–344. .

WEBSTER, R.; OLIVER, M.A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2.ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2007. 315p.

WEST, J.W. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.86, p.2131–2144, 2003. DOI: 10.3168/JDS.S0022-0302(03)73803-X.

#### 4 CAPÍTULO III

### VARIABILIDADE ESPACIAL DA VELOCIDADE DO AR NO INTERIOR DE SISTEMA *COMPOST BARN* ABERTO COM VENTILAÇÃO POR PRESSÃO POSITIVA

**RESUMO:** Em instalações para confinamento de bovinos leiteiros em sistemas *Compost Barn* (CB), a velocidade do ar está diretamente ligada com o conforto térmico dos animais alojados e com a qualidade da cama. Logo, é essencial que sejam realizados procedimentos de avaliação da eficiência de ventilação, para verificar, em campo, se o sistema de ventilação utilizado está adequado ou se há necessidade da realização de ajustes no projeto e/ou manejo. Neste sentido, objetivou-se com este estudo avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial das variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m e velocidade do ar ao nível da cama na área interna de uma instalação para confinamento de bovinos leiteiros em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (CBAVP). O estudo foi conduzido em julho de 2021, em um sistema CBAVP localizado na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. A área interna da instalação foi dividida por meio de malha composta por 55 pontos equidistantes (44 pontos na área de cama, e 11 pontos no corredor de alimentação). Em todos os pontos foram coletados dados de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ ) e, nos 44 pontos que perfaziam a área de cama, foram aferidos dados de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ). As coletas foram realizadas em dois dias de cada uma das três semanas experimentais, nos períodos manhã (09h00min) e tarde (15h00min), constituindo seis repetições. Para caracterização da dependência e distribuição espacial, foram aplicadas técnicas de estatística descritiva e geoestatística. Por meio dos resultados alcançados, foi possível verificar ocorrência de dependência espacial forte para  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$ , em ambos os períodos avaliados (manhã e tarde), condição que viabilizou a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem e geração de mapas de distribuição espacial. A partir dos mapas gerados, observou-se que as distribuições de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  não foram uniformes, e que foram registradas magnitudes de velocidade do ar entre 0,2 e 2,8  $m \cdot s^{-1}$  na altura de 1,5 m, e entre 0,0 e 4,0  $m \cdot s^{-1}$  ao nível da cama. Nas duas alturas consideradas e em ambos os períodos avaliados, os valores de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  foram inferiores ao recomendado pela literatura (1,8  $m \cdot s^{-1}$ ) em mais de 65,0% da área interna da instalação. Níveis adequados de ventilação foram observados apenas nos primeiros 20,0 m da instalação, de Sudeste a Noroeste, como resultado da maior proximidade entre as linhas de ventiladores presentes nesta região.

**Palavras-chave:** confinamento de bovinos leiteiros, eficiência de ventilação, conforto térmico, secagem da cama, geoestatística

## SPATIAL VARIABILITY OF AIR SPEED INSIDE OPEN COMPOST BARN SYSTEM WITH POSITIVE PRESSURE VENTILATION

**ABSTRACT:** In facilities for dairy cattle confinement in Compost Barn (CB) systems, the air velocity is directly linked with the thermal comfort of the animals housed and with the quality of the bedding. Therefore, it is essential that ventilation efficiency assessment procedures are carried out to verify, in the field, if the ventilation system used is adequate or if there is a need to adjust in the design and/or management. In this sense, the objective of this study was to evaluate and characterize the dependence and spatial distribution of the variables air velocity at a height of 1.5 m and air velocity at bed level in the internal area of a facility for confinement of dairy cattle in production, in open Compost Barn system with positive pressure ventilation (CBAVP). The study was conducted in July 2021, in a CBAVP system located in the Zona da Mata region, Minas Gerais, Brazil. The internal area of the installation was divided by means of a mesh composed of 55 equidistant points (44 points in the bed area, and 11 points in the feed alley). At all points, air velocity data were collected at a height of 1.5 m ( $v_{ar,M}$ ) and, at the 44 points that made up the bed area, air velocity data were measured at bed level ( $v_{ar,C}$ ). The collections were carried out on two days of each of the three experimental weeks, in the morning (09h00min) and afternoon periods (15h00min), constituting six repetitions. To characterize the dependence and spatial distribution, descriptive and geostatistical techniques were applied. Through the results achieved, it was possible to verify the occurrence of strong spatial dependence for  $v_{ar,M}$  and  $v_{ar,C}$ , in both periods evaluated (morning and afternoon), a condition that enabled the application of kriging interpolation techniques and generation of maps of spatial distribution. From the generated maps, it was observed that the distributions of  $v_{ar,M}$  and  $v_{ar,C}$  were not uniform, and that magnitudes of air velocity between 0.2 and 2.8  $m \cdot s^{-1}$  were recorded at the height of 1.5 m, and between 0.0 and 4.0  $m \cdot s^{-1}$  at bed level. At the two heights considered and, in both periods, evaluated, the values of  $v_{ar,M}$  and  $v_{ar,C}$  were lower than those recommended by the literature (1.8  $m \cdot s^{-1}$ ) in more than 65.0% of the internal area of the installation. Adequate ventilation levels were observed only in the first 20.0 m of the installation, from Southeast to Northwest, because of the greater proximity between the lines of fans present in this region.

**Keywords:** dairy cattle confinement, ventilation efficiency, thermal comfort, bed drying, geostatistics

#### 4.1 INTRODUÇÃO

A produção de leite em regiões de climas tropical e subtropical é uma atividade particularmente desafiadora aos produtores, notadamente quando explorados bovinos leiteiros com maior potencial produtivo. O problema é que estes animais normalmente são originários de países de climas temperados e, portanto, aclimatados para condições de frio (Vasconcelos & Demétrio, 2011). Logo, quando expostos às altas temperaturas comuns no Brasil, podem sofrer com estresse térmico e, conseqüentemente, ter seu desempenho produtivo e reprodutivo negativamente afetado (Pinheiro et al., 2015; Valente et al., 2020).

Quando se busca melhorar o ambiente térmico de produção de leite com vistas a possibilitar maior produtividade, melhor qualidade do leite, uso racional dos recursos naturais e controle das emissões de gases de efeito estufa, o confinamento dos bovinos leiteiros em instalações parcialmente fechadas é uma das estratégias mais utilizadas (Perissinotto et al., 2009; Mee & Boyle, 2020; Galama et al., 2020). Dentre os diferentes sistemas de confinamento de bovinos leiteiros utilizados no Brasil, nos últimos anos tem-se observado crescimento expressivo na implantação do modelo conhecido como *Compost Barn (CB)*, sistema este já bastante difundido e consolidado em países da Europa e América do Norte (Damasceno, 2020).

Os primeiros sistemas *CB* construídos no Brasil foram projetados seguindo recomendações norte-americanas, mas optando-se pela concepção de instalações com laterais abertas (Damasceno, 2020). De modo geral, são empregados sistemas de ventilação mecânica, por não ser possível assegurar, somente com uso de ventilação natural, condições adequadas de conforto para os animais alojados, bem como de aeração adequada para o processo de compostagem da cama (Pilatti & Vieira, 2017; Caldato et al., 2020).

Em instalações *CB* com laterais abertas, normalmente são utilizados sistemas mecânicos de ventilação por pressão positiva, com uso de ventiladores de baixo volume e alta rotação (*LVHS*), ou de alto volume e baixa rotação (*HVLS*) (Leso et al., 2018). Por meio do uso destes sistemas de ventilação, objetiva-se melhorar as condições ambientais no interior da instalação *CB* (temperatura do ar –  $t_{bs}$ , umidade relativa do ar – UR e velocidade do ar –  $v_{ar}$ ) e, conseqüentemente, o desempenho produtivo dos bovinos leiteiros, assim como a qualidade da cama (Damasceno, 2020; Leso et al., 2020).

Segundo Black et al. (2013), os sistemas de ventilação aplicados às instalações *CB* devem assegurar que a velocidade do ar ( $v_{ar}$ ) seja mantida próxima de  $1,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  em toda a área

interna da instalação, possibilitando secar a cama, remover gases e favorecer as trocas térmicas, bem como evitar estresse aos animais. De fato, a  $v_{ar}$  está diretamente ligada ao bem-estar animal, ao conforto térmico e a qualidade da cama em sistemas *CB*. Portanto, no caso de instalações abertas, em que não se tem um controle muito uniforme sobre as taxas de ventilação, devido a correntes momentâneas de ar naturais, é essencial que sejam realizados procedimentos de avaliação da eficiência de ventilação, de maneira a verificar, em campo, se o sistema de ventilação utilizado está adequado ou se há necessidade da realização de ajustes no projeto e/ou manejo.

Em sistemas *CB*, é importante que os procedimentos de avaliação da eficiência de ventilação sejam realizados em diferentes alturas, preferencialmente na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ ) e ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ). Na altura de 1,5 m (centro de massa médio de bovinos leiteiros), o interesse é avaliar o grau de conforto térmico dos animais posicionados de pé, haja vista que a velocidade do ar tem influência direta sobre a temperatura superficial e as respostas fisiológicas destes animais (Almeida et al., 2010; Pilatti et al., 2019). Ao nível da cama, o interesse é avaliar a magnitude de velocidade do ar experimentada pelos animais deitados e disponível para secagem da cama (Black et al., 2013; Damasceno, 2020).

Assim, muito embora um sistema de ventilação seja dimensionado ainda na fase de projeto de uma nova instalação, avaliações em campo devem ser realizadas *a posteriori*, para que sejam realizados consequentes ajustes e refinamentos. Em todos os casos, devem ser utilizados métodos e ferramentas computacionais adequados, capazes de auxiliar no diagnóstico da real situação do ambiente e na tomada de decisão para conferir melhorias ao mesmo. Dentre estes processos de avaliação, destaca-se o emprego das técnicas de geoestatística, que permitem avaliar dependência e distribuição espacial de diferentes variáveis e analisar os resultados com base na estruturação natural dos dados (Cambardella & Elliott, 1992; Medeiros et al., 2014; Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021).

Ante o exposto, objetivou-se com este estudo avaliar e caracterizar dependência e distribuição espacial das variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m e ao nível da cama, na área interna de uma instalação para confinamento de bovinos leiteiros em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*).

## 4.2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido durante o período de três semanas de julho de 2021, no inverno, estação climática na qual geralmente são observadas condições de excesso de umidade da cama em sistemas *CB*, fator considerado como ponto-chave para o sucesso do sistema e que,

portanto, deve ser controlado. Todos os procedimentos foram realizados em conformidade com as diretrizes recomendadas pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal Viçosa (Processo 04/2021).

#### 4.2.1 Caracterização da instalação *Compost Barn* e das práticas de manejo

As coletas de dados experimentais foram realizadas em uma instalação para confinamento de bovinos leiteiros em lactação, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*). A propriedade comercial onde foi realizado o estudo está localizada na mesorregião da Zona da Mata Mineira, nas seguintes coordenadas: latitude 20° 46' 41" S; longitude 42° 48' 51" W; e altitude 670 m. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como Cwa – subtropical mesotérmico, com inverno seco e frio e verão chuvoso e quente (Sá Júnior et al., 2012).

O sistema *CBAVP* foi construído em julho de 2019, tinha orientação Sudeste-Noroeste e apresentava como características construtivas: 60,0 m de comprimento, 27,6 m de largura, 5,0 m de pé-direito, telhado de duas águas, com estrutura e cobertura metálica, presença de abertura central com sobreposição de 1,0 m, e beiral de 2,2 m. O interior do sistema era composto por 864,0 m<sup>2</sup> de área de cama, 252,0 m<sup>2</sup> de corredor de alimentação, onde estavam instalados quatro bebedouros do tipo basculante (2,0 m de comprimento cada), 276,0 m<sup>2</sup> de pista de trato, com comedouro único de 60,0 m de comprimento, e 85,8 m<sup>2</sup> de corredor de serviço (Figura 4.1).

Ao redor de toda a área de cama da instalação, foram construídas pequenas muretas de concreto (0,2 m de altura), com funções de evitar perdas de material de cama, passagem de material de cama para o corredor de alimentação e/ou de dejetos do corredor de alimentação para a cama. Nos locais onde estavam instalados bebedouros, havia muretas de concreto mais altas (1,2 m), para conter os animais, evitando que tivessem acesso à água diretamente da área de cama, o que poderia molhá-la. Os corredores de alimentação, de serviço e a pista de trato tinham piso de concreto com frisos.

A ventilação instalada no local era do tipo pressão positiva, fornecida por meio de seis ventiladores mecânicos de baixo volume e alta rotação: dois ventiladores de três hélices, 1,52 m de diâmetro, 1,5 cv de potência e 86.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados na face Sudeste da instalação; e quatro ventiladores de seis hélices, diâmetro de 1,53 m, 2,0 cv de potência e 55.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados ao longo da instalação (cotas 12,0 e 36,0 m, com relação a face Sudeste). Os ventiladores estavam instalados a 3,0 m de altura, com inclinação de 45° em relação a horizontal, e permaneciam acionados ininterruptamente (24 h·dia<sup>-1</sup>).

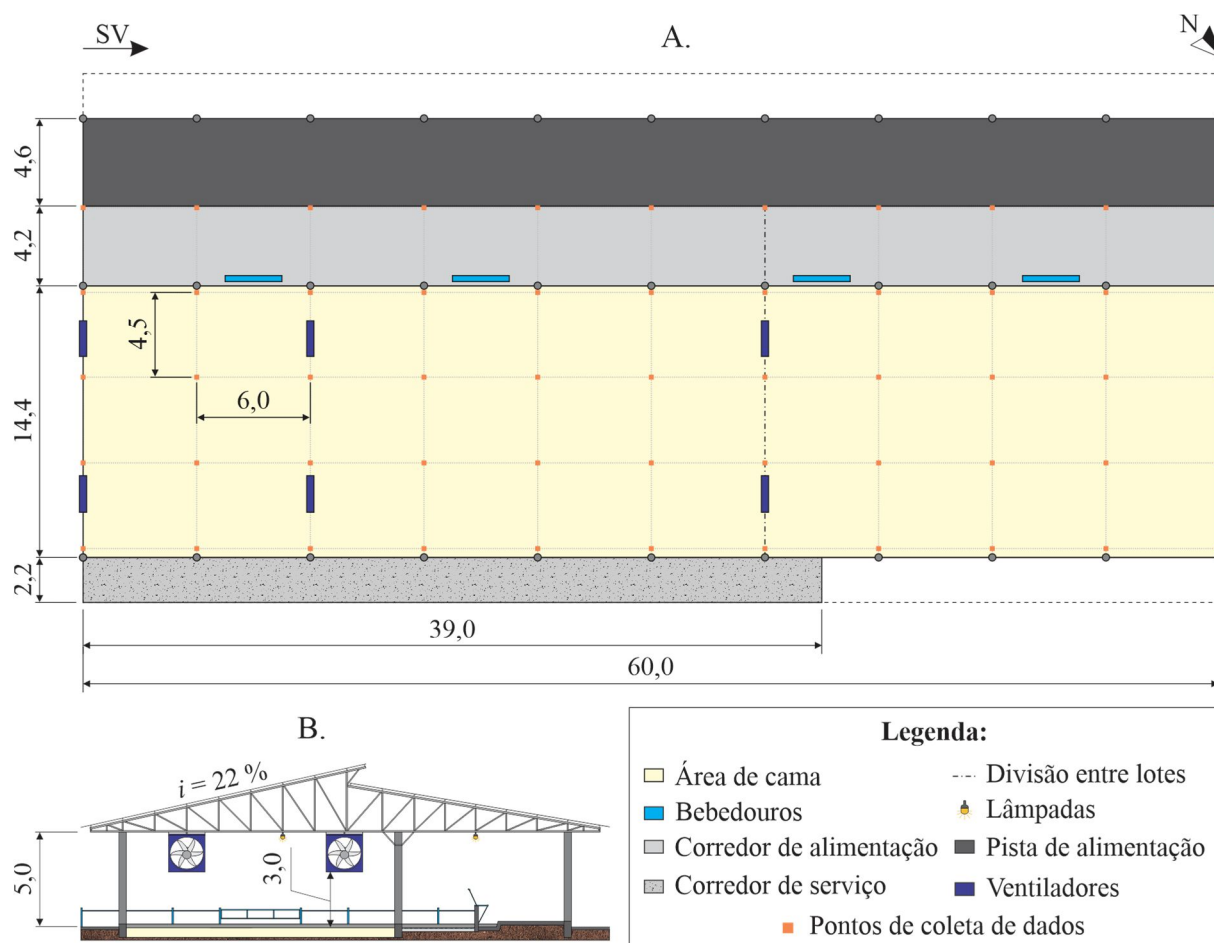


Figura 4.1. Representação esquemática da instalação *Compost Barn* onde foram coletados os dados experimentais: planta baixa com pontos de coleta (A) e corte transversal (B). \*SV – sentido da ventilação;  $i$  – inclinação do telhado; N – indicação do Norte; medidas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

A instalação contava com sistema de iluminação fornecido por meio de dezoito lâmpadas de LED de 100 W, instaladas a 4,8 m acima da cama, e distribuídas ao longo da instalação, sendo nove na região central da área de cama e nove na região de fronteira entre corredor e pista de alimentação. O sistema de iluminação era acionado apenas durante o período noturno (18h00min às 06h00min).

A cama era constituída por uma mistura de maravalha e serragem de madeira, em forma de colchão, com cerca 0,6 m de espessura, e tempo de uso de aproximadamente quatro meses (início do estudo). Para arranjo da cama, na etapa inicial foi adicionada uma camada de 0,3 m de serragem seca, que, conjuntamente com as fezes e urina depositadas pelos animais, iniciaram o processo de semi-compostagem. Sequencialmente, materiais secos (maravalha e serragem de madeira) foram inseridos, sempre que a umidade da cama se elevou muito, causando aumento de sujidade dos animais, compactação e situação de anaerobiose na cama. Ao longo do período

experimental, a reposição ou adição de material seco foi realizada por duas vezes, quando foi observado que a cama estava com excesso de umidade.

Para revolvimento do material de cama, era utilizado um implemento híbrido (escarificador de cama com rolo destoroador, 2,0 m de largura de atuação, 5 hastes, 0,5 m de profundidade máxima e 540 rpm de rotação máxima, profundidade efetiva de revolvimento de 0,3 m), tracionado por um trator (linha leve, 78 cv e 2400 rpm de rotação nominal). A operação de revolvimento era realizada duas vezes ao dia (09h00min e 16h00min), seguindo rotina padrão definida na fazenda.

Os bovinos leiteiros alojados no interior do sistema permaneceram distribuídos em dois lotes, conforme sua produtividade de leite e seguindo a rotina estabelecida na propriedade. Animais com maior produtividade ficavam alojados no Lote 1, que tinha 518,4 m<sup>2</sup> (36,0 x 14,4 m) de área de cama, e estava situado próximo a face Sudeste da instalação. Por sua vez, os animais com menor produtividade permaneceram alojados no Lote 2, que tinha 345,6 m<sup>2</sup> (24,0 x 14,4 m) de área de cama, e estava localizado próximo a face Noroeste da instalação. Durante todo o período experimental, 80 vacas Holandesas (Puro de Origem – PO, peso médio de 600 kg, em lactação) permaneceram alojadas no sistema, sendo que 45 ficaram alojadas no Lote 1 (11,5 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup>), e 35 permaneceram confinadas no Lote 2 (9,9 m<sup>2</sup>·animal<sup>-1</sup>).

A rotina padrão de atividades no sistema foi mantida ao longo do período experimental, sendo realizadas duas ordenhas e fornecido alimento também duas vezes ao dia. As ordenhas iniciavam às 04h00min e às 16h00min, tinham duração média de 02h30min, e eram executadas em uma sala tipo espinha de peixe 2x6, em anexo a instalação. O acesso dos animais ao corredor de alimentação, onde era disponibilizada alimentação e água, era livre durante todo o dia. A limpeza do piso do corredor de alimentação era realizada uma vez ao dia, no período manhã, utilizando *flushing*.

#### **4.2.2 Aquisição dos dados de velocidade do ar**

Para coletas dos dados de interesse, a zona ocupada pelos animais (ZOA), constituída pelas áreas de cama e de corredor de alimentação, foi subdividida por meio de uma malha regular (6,0 x 4,5 m), composta por 55 pontos equidistantes. Os pontos foram distribuídos ao longo das áreas de cama e de corredor de alimentação, conforme as características construtivas da instalação (Figura 4.1A).

Os dados de magnitude de velocidade do ar foram aferidos utilizando um anemômetro de fio quente (Instrutherm<sup>®</sup>, modelo TAFR-190, com escala entre 0,1 e 25,0 m·s<sup>-1</sup> e 5% de acurácia). As coletas foram realizadas em duas diferentes alturas: 1,5 m acima do nível da cama

( $v_{ar,M}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ), para verificar a magnitude de velocidade experimentada pelos animais posicionados de pé; e ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ), para verificar, simultaneamente, a magnitude de velocidade do ar experimentada pelos animais e disponível para secagem da cama. Para a realização das coletas, o anemômetro de fio quente foi posicionado em cada ponto de coleta, nas regiões de cama e de corredor de alimentação, totalizando 55 pontos de  $v_{ar,M}$  (ZOA – área de cama + corredor de alimentação) e 44 pontos de coleta de  $v_{ar,C}$  (área de cama). Por se tratar de uma instalação aberta, que sofre influência das correntes de vento externas,  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  foram mensuradas por seis vezes durante o período experimental, nos períodos manhã (09h00min) e tarde (15h00min). Todas as coletas foram realizadas com o sistema de ventilação em funcionamento (seis ventiladores ligados em velocidade máxima) e com presença de animais no interior da instalação. Para caracterização das correntes de ar no ambiente externo, também foram coletados dados de magnitude de velocidade do ar no exterior da instalação ( $v_{ar,Ext}$ ), nos mesmos dias e horários em que foram realizadas coletas no interior da instalação.

### 4.2.3 Análises estatísticas

#### 4.2.3.1 Análises de estatística descritiva

Os dados médios de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  foram avaliados inicialmente por meio de estatística descritiva. Para cada variável e em cada período (manhã e tarde), foram obtidos valores de média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV), curtose (Curt.) e assimetria (Ass.). A avaliação da dispersão dos dados experimentais foi realizada por meio da classificação de CV proposta por Warrick & Nielsen (1980), com considera como baixa dispersão dados com CV menor 0,12, moderada dispersão dados com CV entre 0,12 e 0,24, e alta dispersão dados com CV maior que 0,24.

#### 4.2.3.2 Análises de geoestatística

A avaliação da variabilidade espacial dos níveis de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  no interior da instalação foi realizada utilizando técnicas de geoestatística. As análises foram realizadas utilizando o sistema computacional R Development Core Team (2016), por meio da biblioteca geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001).

A dependência espacial das variáveis de interesse foi avaliada por meio de ajustes de semivariograma, utilizando o estimador de Matheron (1962), conforme a Equação 4.1.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (4.1)$$

Em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância;

$N(h)$  é o número de pares de observações  $Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$ ;

$Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$  são as observações experimentais; e

$h$  é a distância que separa as observações experimentais.

Para ajuste dos semivariogramas experimentais, foram utilizados os métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*) e da Máxima Verossimilhança Restrita (*Restricted Maximum Likelihood – REML*). Em todos os casos, foram testados os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano (equações 4.2, 4.3 e 4.4, respectivamente), conforme sugerido por Vieira et al. (2010a).

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right) - 0,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right], \text{ se } h \leq a \quad (4.2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1, \text{ se } h > a$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1 - \text{EXP} \left( \frac{-3h}{a} \right) \right] \quad (4.3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left\{ 1 - \text{EXP} \left[ -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (4.4)$$

Em que:  $C_0$  é o efeito pepita;

$C_1$  é o patamar; e

$a$  é o alcance.

Procedimentos de validação cruzada foram realizados para avaliação e escolha dos ajustes obtidos, sendo calculados erro médio ( $E_M$ ), desvio padrão do erro médio ( $DP_M$ ), erro reduzido ( $E_R$ ) e desvio padrão do erro reduzido ( $DP_R$ ), conforme descrito por Ferraz et al. (2020). Para cada variável, foi escolhido o ajuste em que foram obtidos  $E_M$  e  $E_R$  mais próximos de zero, menor  $DP_M$  e  $DP_R$  mais próximo de um, conforme recomendado por Isaaks & Srivastava (1989). Dos modelos matemáticos  $\hat{\gamma}(h)$  escolhidos para cada variável, foram extraídos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma: efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ), alcance ( $a$ ) e alcance prático ( $a'$ ).

Para avaliação da dependência espacial (DE), foi utilizado o grau de dependência espacial (GDE), obtido por meio da razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C_1$ ). A análise do GDE foi realizada utilizando a classificação de Cambardella et al. (1994), que elenca a DE como forte ( $GDE \leq 0,25$ ), moderada ( $0,25 < GDE \leq 0,75$ ), e fraca ( $GDE > 0,75$ ).

Por fim, definidos os semivariogramas com melhor ajuste e verificada a ocorrência de dependência espacial, utilizou-se a técnica de krigagem ordinária para estimativa das magnitudes de velocidade do ar em regiões não amostradas. A partir dos dados interpolados, foram gerados mapas de distribuição espacial, por meio do uso do programa computacional ArqGIS<sup>®</sup>, versão 10.1, com licença de uso do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Para obter informações numéricas detalhadas sobre as frações de área ocupadas por cada classe das variáveis avaliadas, foram gerados histogramas.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 estão listados os dados de análise descritiva e os métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas experimentais ajustados para as variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{a,C}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ), na área interna do sistema *CBAVP* (períodos manhã e tarde).

Por meio da Tabela 4.1, pode-se observar que em ambos os período avaliados (manhã e tarde), os valores médios registrados para  $v_{ar,M}$  foram bem próximos entre si ( $1,5 \pm 0,4$  e  $1,4 \pm 0,3 m \cdot s^{-1}$ ), indício de que esta variável teve perfil com comportamento semelhante, independente do período avaliado. De fato, a principal vantagem esperada com o uso de sistemas de ventilação mecânica é ter controle sobre uniformidade e constância do escoamento de ar, independente das condições climáticas, conforme Damasceno (2020).

Comportamentos semelhantes foram observados para  $v_{ar,C}$  (Tabela 4.1), em que foram registrados valores médios de  $1,5 \pm 0,6$  e  $1,6 \pm 0,7 m \cdot s^{-1}$ , nos períodos manhã e tarde, respectivamente. O registro de valores médios de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  próximos entre si é um indício de que o sistema de ventilação mecânica utilizado estava sendo efetivo em manter este atributo constante em diferentes alturas, ao longo da instalação.

Conforme pode-se observar pela Tabela 4.1, em ambos os períodos avaliados (manhã e tarde) os valores de média e mediana obtidos para as variáveis  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  foram próximos entre si e, portanto, pode-se inferir que estes atributos apresentam distribuição próxima da normal (Little & Hills, 1978). De acordo com a classificação sugerida por Warrick & Nielsen (1980), verificou-se que os dados de velocidade do ar apresentaram alta variabilidade ( $CV > 0,24$ ), com exceção de  $v_{ar,M}$  no período tarde, em que a dispersão dos dados foi classificada como moderada ( $CV = 0,23$ ). Conforme Faria et al. (2008), a velocidade do ar é um atributo com elevada variabilidade espacial e temporal, que pode sofrer mudanças abruptas de magnitude e direção e, portanto, é comum que os dados desta variável apresentem elevada dispersão, mesmo em instalações com uso de ventilação mecânica.

Tabela 4.1. Análise descritiva dos valores médios das variáveis velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{\text{ar,M}}$ , em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{\text{ar,C}}$ , em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) no interior da instalação *Compost Barn* aberta durante o período de inverno.

| Variável          | Período | Média | Mediana | Mínimo | Máximo | DP  | CV   | Curt. | Ass. |
|-------------------|---------|-------|---------|--------|--------|-----|------|-------|------|
| $v_{\text{ar,M}}$ | Manhã   | 1,5   | 1,4     | 0,6    | 3,3    | 0,4 | 0,25 | 3,41  | 0,53 |
|                   | Tarde   | 1,4   | 1,4     | 0,4    | 2,6    | 0,3 | 0,23 | 2,50  | 0,13 |
| $v_{\text{ar,C}}$ | Manhã   | 1,5   | 1,3     | 0,2    | 4,0    | 0,6 | 0,41 | 3,89  | 1,14 |
|                   | Tarde   | 1,6   | 1,5     | 0,2    | 4,2    | 0,7 | 0,44 | 4,06  | 1,11 |

\* DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Curt. – curtose; Ass. – assimetria.

Tabela 4.2. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para os valores médios de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{\text{ar,M}}$ ) e velocidade do ar nível da cama ( $v_{\text{ar,C}}$ ) no interior do sistema *Compost Barn* aberto durante o período de inverno.

| Variável          | Período | Método | Modelo    | $C_0$  | $C_1$  | $C_0 + C_1$ | $a$    | $a'$    | GDE    | $E_M$   | $DP_M$ | $E_R$   | $DP_R$ |
|-------------------|---------|--------|-----------|--------|--------|-------------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|--------|
| $v_{\text{ar,M}}$ | Manhã   | REML   | Esférico  | 0,0227 | 0,2968 | 0,3195      | 5,4773 | 5,4773  | 0,0710 | -0,0005 | 0,5745 | -0,0004 | 1,0091 |
|                   | Tarde   | REML   | Esférico  | 0,0157 | 0,2317 | 0,2474      | 5,7163 | 5,7163  | 0,0635 | -0,0007 | 0,5049 | -0,0007 | 1,0093 |
| $v_{\text{ar,C}}$ | Manhã   | REML   | Gaussiano | 0,0000 | 0,6892 | 0,6892      | 6,0831 | 10,5288 | 0,0000 | -0,0120 | 0,4273 | -0,0116 | 0,8959 |
|                   | Tarde   | REML   | Gaussiano | 0,0000 | 0,8744 | 0,8744      | 7,2697 | 12,5825 | 0,0000 | -0,0146 | 0,3305 | -0,0183 | 0,9853 |

\* Mad. – Madrugada;  $C_0$  – efeito pepita;  $C_1$  – contribuição;  $C_0 + C_1$  – patamar;  $a$  – alcance;  $a'$  – alcance prático; GDE – grau de dependência espacial;  $E_M$  – erro médio;  $DP_M$  – desvio padrão do erro médio;  $E_R$  – erro reduzido;  $DP_R$  – desvio padrão do erro reduzido; e REML – Método da Máxima Verossimilhança Restrita.

Com relação aos ajustes de semivariogramas (Tabela 4.2), os melhores resultados foram obtidos utilizando o Método da Máxima Verossimilhança Restrita (REML). Este método tem sido utilizado para ajustes de pequenos agrupamentos de dados, por resultar em estimativas menos enviesadas (Marchant & Lark, 2007; Ferraz et al., 2019).

Para  $v_{ar,M}$  os melhores resultados foram obtidos utilizando os modelos Esférico, ao passo que para  $v_{ar,C}$  foram alcançados com uso do modelo Gaussiano (Tabela 4.2). Estes dois modelos são apropriados para descrever a distribuição espacial das variáveis em estudo, pois suas funções são positivas condicionais, condição que assegura que as variâncias calculadas também foram positivas (McBratney & Webster, 1986; Vieira et al., 2010b). Tomando como base os dados extraídos das validações cruzadas, pode-se concluir que os ajustes realizados foram satisfatórios, uma vez que os valores de  $E_M$  e  $E_R$  foram próximos de zero, assim como os valores de  $DP_R$  foram próximos de um, conforme recomendado por Isaaks & Srivastava (1989).

Para ambas as variáveis ( $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$ ) e em ambos os períodos (manhã e tarde), os valores de variabilidade não explicada (efeito pepita –  $C_0$ ) foram baixos, quando comparados com o patamar ( $C_0 + C_1$ ) (Tabela 4.2). Considerando a classificação sugerida por Cambardella et al. (1994), verificou-se que todos os valores de grau de dependência espacial (GDE) foram baixos ( $< 0,25$ ), caracterizando ocorrência de forte dependência espacial. O valor mais elevado foi obtido para a variável  $v_{ar,M}$  no período tarde, em que foi obtido GDE igual a 0,0710. Por meio destes resultados, pode-se concluir que o uso das técnicas de krigagem ordinária retornaram resultados representativos das variáveis, haja vista que a contribuição do efeito pepita para o patamar foi baixa (Curi et al., 2017).

De acordo com Andriotti (2003), outro importante parâmetro da geoestatística é o alcance ( $a$ ), que é utilizado para determinação do limite de dependência espacial, separando amostras correlacionadas entre si de amostras independentes. Por meio da Tabela 4.2, pode-se observar que em todos os casos os valores de  $a$  foram superiores a menor distância entre pontos de coleta (4,5 m), reforçando que os pontos amostrados possuíam correlação entre si e que havia ocorrência de dependência espacial (Vieira, 2000; Andriotti, 2003). Os valores mais baixos foram observados para  $v_{ar,M}$  no período manhã, em que  $a = 5,4773$  m. Ante este resultado, pode-se concluir que a distância entre pontos de coleta empregada foi adequada, atendendo a todas as variáveis avaliadas.

Uma vez observada a ocorrência de dependência espacial forte (Tabela 4.2), as técnicas de interpolação por krigagem ordinária puderam ser empregadas para estimar os dados em locais não amostrados, permitindo gerar mapas de distribuição espacial. Estes mapas foram utilizados para identificar locais com baixa e/ou excessiva velocidade do ar, de modo a serem

propostas soluções de melhorias no ambiente (Faria et al., 2008). Na Figura 4.2 estão ilustrados os mapas de  $v_{ar,M}$ , nos períodos manhã e tarde.

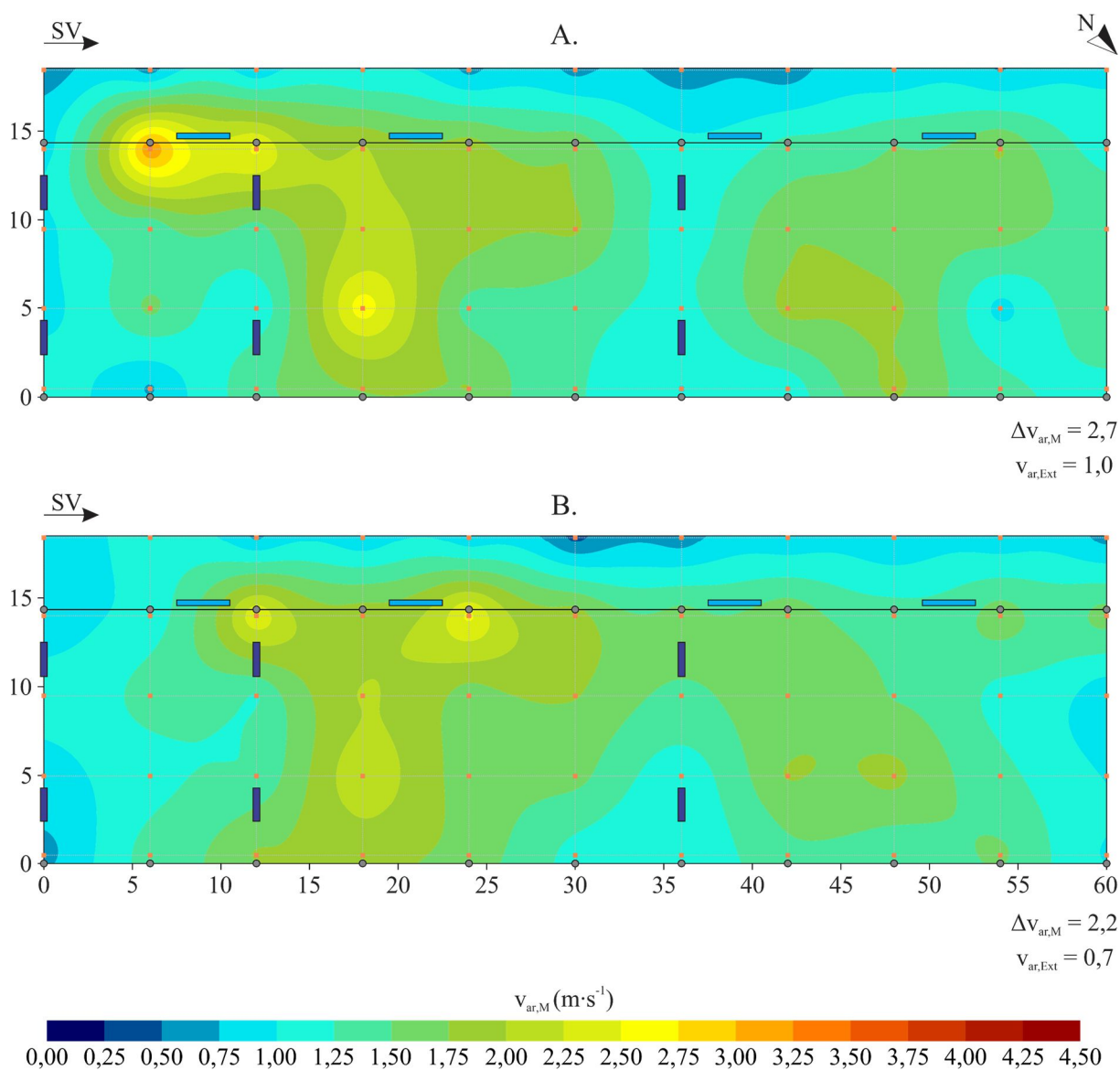


Figura 4.2. Distribuição espacial de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B). \*SV – sentido da ventilação;  $\Delta v_{ar,M}$  – amplitude de variação da velocidade do ar na altura de 1,5 m;  $v_{ar,Ext}$  – velocidade do ar média no exterior da instalação cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Conforme pode-se observar por meio da análise da Figura 4.2, as magnitudes médias de  $v_{ar,M}$  apresentaram distribuições heterogêneas no interior da instalação, mas foram semelhantes entre os períodos avaliados (manhã e tarde). A amplitude média de variação de  $v_{ar,M}$  foi maior no período manhã ( $\Delta v_{ar,M} = 2,7 m \cdot s^{-1}$ ), mas os valores mínimos e máximos foram sempre registradas nos mesmos locais. Os valores mínimos de  $v_{ar,M}$  foram observados em locais periféricos, especialmente em regiões próximas ao corredor de alimentação, ao passo que

valores mais elevados de  $v_{ar,M}$  foram registrados na área de cama, nas proximidades de muretas de proteção de bebedouros (zonas de atuação das linhas de ventilação). Não foi registrada ocorrência de regiões com  $v_{ar,M}$  excessivamente alta ( $> 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Por meio da Figura 4.2, pode-se observar que ao longo da linha de comedouros do corredor de alimentação da instalação (face Sudoeste) foram registradas magnitudes médias de velocidades baixas ( $< 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Pode-se inferir que a sua ocorrência se deu pela presença de muretas de proteção entre a área de cama e os bebedouros presentes no corredor de alimentação da instalação (altura de 1,2 m), que, conforme Mondaca et al. (2019), funcionam como uma barreira física para o escoamento de ar, reduzindo e/ou impedindo a sua passagem para o corredor de alimentação. Se por um lado a presença destas muretas reduz e/ou impede a passagem das correntes de escoamento de ar para o corredor de alimentação, por outro possibilita o aumento das magnitudes médias de velocidade do ar em suas proximidades, na região da cama. A título de exemplo, os valores mais altos de  $v_{ar,M}$  ( $> 3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) foram registrados na área de cama próximo de uma mureta, no período manhã (Figura 4.2A).

Estudos conduzidos por Berman (2008) e Mondaca et al. (2019) avaliaram transferência de calor e respostas fisiológicas de bovinos leiteiros em lactação sob condições de estresse térmico, e observaram que magnitudes de velocidade superiores a  $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  possibilitaram melhorar o conforto térmico dos animais alojados. Em sistemas *CB*, em específico, recomenda-se que a velocidade do ar seja mantida próxima de  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em toda a zona ocupada pelos animais (ZOA, abaixo de 1,5 m), possibilitando assegurar a secagem a cama e remoção de gases, bem como favorecendo trocas térmicas (Black et al., 2013). Admitindo a magnitude de velocidade do ar recomendada por Black et al. (2013) como a velocidade mínima do ar de resfriamento e secagem da cama ( $VMARS = 1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), verificou-se que nos períodos manhã e tarde houve ocorrência de regiões com valores de  $v_{ar,M}$  inferiores ao recomendado (Figura 4.2). Em ambos os horários, notou-se que as maiores magnitudes de velocidade foram registradas nas zonas de atuação dos ventiladores, indicativo de que ocorreram devido a presença de ventilação mecânica. Todavia, observou-se também que houve ocorrência de zonas com baixa  $v_{ar,M}$ , em que foram obtidas magnitudes de velocidade próximas as registradas no ambiente externo ( $v_{ar,Ext}$  média igual 1,0 e  $0,7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , nos períodos manhã e tarde, respectivamente). Estas zonas foram observadas nas regiões inicial, central e posterior da instalação, onde pode-se inferir que o efeito da ventilação mecânica não foi notado.

Fagundes et al. (2020) utilizaram técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) para avaliar o escoamento de ar gerado por ventiladores de baixo volume e alta rotação (*LVHS*). Os autores verificaram que na região diretamente abaixo da primeira linha de ventiladores ocorria

a formação de uma zona com baixa magnitude de velocidade do ar. Como os ventiladores estavam instalados a 3,0 m de altura e com inclinação de 45° com relação a horizontal, estima-se que o fluxo de ar na região imediatamente anterior era succionado e direcionado por estes equipamentos, formando uma zona com baixa  $v_{ar,M}$  imediatamente abaixo deles. De fato, por meio dos resultados retratados na Figura 4.2, pode-se inferir que a quantidade e disposição dos equipamentos presentes na instalação não estava adequada.

Ao longo da área da instalação, a formação de regiões com baixa  $v_{ar,M}$  também ocorreu nas regiões central e posterior (Noroeste) (Figura 4.2). Isto ocorria porque a distância entre linhas de ventiladores era muito superior a recomendada (12,0 m, conforme Damasceno, 2020) e, portanto, não havia evidências da ocorrência de continuidade das correntes de ar de ventilação, necessárias para manter a uniformidade do escoamento de ar.

De acordo com Mondaca et al. (2019), em instalações utilizadas para confinamento de animais, cerca de 78,0% do escoamento de ar ocorre acima ou ao redor da ZOA. Portanto, por meio dos resultados de  $v_{ar,M}$  retratados neste estudo (Figura 4.2), pode-se inferir que as menores magnitudes de  $v_{ar,M}$  observadas devem-se, em partes, a perda de carga causada pela presença dos animais e demais obstáculos contidos na ZOA, tais como muretas, pilares etc.

No caso da região de corredor de alimentação, em que foram registradas baixas magnitudes de  $v_{ar,M}$  (Figura 4.2), aumentar a taxa geral de ventilação no interior da instalação seria pouco efetivo em reduzir a área com  $v_{ar,M}$  inferior a VMARS, conforme afirmado por Mondaca et al. (2019). Como forma de melhorar o microambiente na citada região, é recomendável utilizar soluções localizadas de ventilação, por meio de sistemas de ventilação de baixa pressão estática associado ao resfriamento adiabático evaporativo, que podem ser acionados apenas quando identificadas condições caracterizadas como de desconforto térmico.

Para obtenção das frações de área ocupadas por cada classe das variáveis avaliadas, foram gerados gráficos de distribuição de frequência. Na Figura 4.3 estão ilustrados os gráficos de  $v_{ar,M}$  nos períodos manhã e tarde.

Conforme pode-se observar por meio da Figura 4.3, a magnitude de  $v_{ar,M}$  nos períodos manhã e tarde foi inferior a  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em cerca de 78,4 e 82,8% da área interna da instalação, respectivamente. Por meio destes números, torna-se evidente que o sistema de ventilação mecânica presente no local não era capaz de assegurar condições uniformes, constantes e independentes de distribuição da  $v_{ar,M}$  no interior da instalação. De fato, em sistemas *CB* abertos é difícil controlar a uniformidade das taxas de ventilação, devido a correntes momentâneas de ar naturais, mas com o uso de ventilação mecânica era esperado que a distribuição fosse mais uniforme.

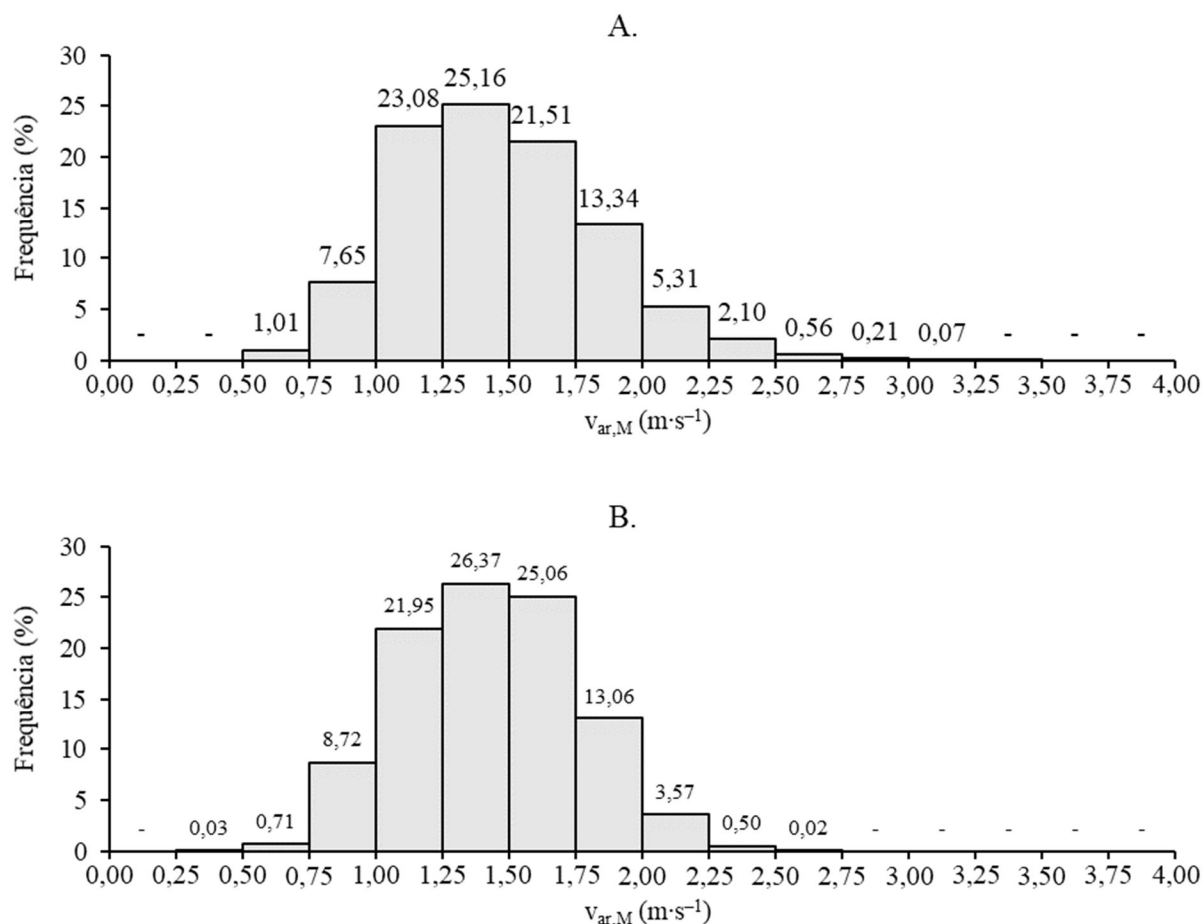


Figura 4.3. Distribuição de frequência de velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ , em m·s<sup>-1</sup>): períodos manhã (A) e tarde (B). Fonte: O autor (2022).

Conforme já discutido, a manutenção da  $v_{ar,M}$  em níveis adequados é muito importante para o favorecimento das trocas térmicas, pois quando não são assegurados níveis adequados de  $v_{ar,M}$  ao longo de toda a área da instalação, como foi observado neste estudo (Figura 4.2), pode ocorrer formação de gradientes de temperatura. No período mais quente do dia (tarde), em que geralmente são registrados valores de temperatura do ar acima do limiar de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação (24,0 °C, conforme Nääs, 1989), pode-se inferir que as regiões com baixas magnitudes de  $v_{ar,M}$  observadas neste estudo (Figura 4.2B) foram preteridas pelos animais, conforme retratado por Damasceno (2020). Se isso ocorreu, os animais tenderam a se agrupar em regiões com temperaturas do ar mais amenas e/ou com maiores magnitudes de  $v_{ar,M}$  velocidades do ar, acarretando aumento de risco de acidentes por pisoteio de tetos e cauda, compactação e piora da qualidade da cama.

Na Figura 4.4 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em m·s<sup>-1</sup>), nos períodos manhã e tarde.

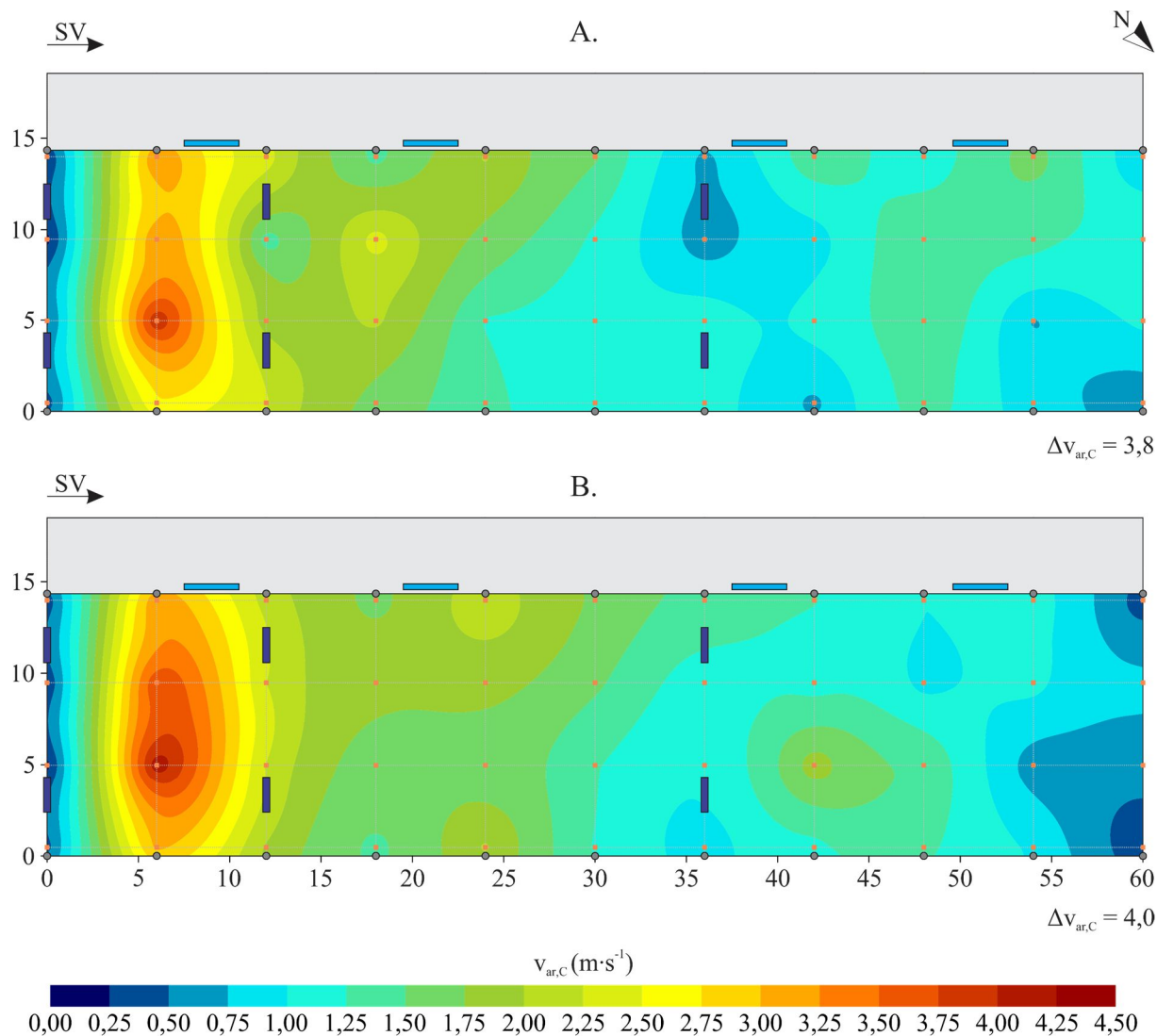


Figura 4.4. Distribuição espacial de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em  $m \cdot s^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B). \*SV – sentido da ventilação;  $\Delta v_{ar,C}$  – amplitude de variação da velocidade do ar ao nível da cama; cotas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Por meio da Figura 4.4, verificou-se que a distribuição de  $v_{ar,C}$  no interior da instalação foi muito heterogênea nos dois períodos avaliados, conforme pode-se observar por meio das elevadas amplitudes de variação (manhã –  $\Delta v_{ar,C} = 3,8 m \cdot s^{-1}$ ; tarde –  $\Delta v_{ar,C} = 4,0 m \cdot s^{-1}$ ). Nos dois períodos avaliados, as magnitudes de  $v_{ar,C}$  apresentaram perfis de distribuição semelhantes, indício de que este atributo não sofre alterações abruptas entre períodos.

Conforme Oliveira et al. (2019), mesmo em sistemas *CB* com laterais abertas, em que há aproveitamento das correntes de ar naturais, o uso de sistemas mecânicos de ventilação é indispensável. No presente estudo, verificou-se que, mesmo com o uso de ventilação mecânica (*LVHS*), a distribuição de  $v_{ar,C}$  não foi uniforme no interior da instalação (Figuras 4.4). Nos horários manhã e tarde, apenas nos primeiros 20,0 m do comprimento da instalação (de Sudeste

a Noroeste) a  $v_{ar,C}$  foi igual ou superior a recomendada para secagem da cama, remoção de gases e favorecimento das trocas térmicas (VMARS). Em todo o restante da área, bem como na região inicial da face Sudeste, a magnitude de  $v_{ar,C}$  foi inferior a VMARS. Do mesmo modo que para  $v_{ar,M}$ , não foram registradas regiões com excessiva  $v_{ar,C}$  ( $> 5,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Por meio da observação conjunta das Figuras 4.2 e 4.4, pode-se verificar que os locais com baixas  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  na área de cama são, em partes, coincidentes (regiões inicial e a partir da segunda metade da instalação, de Sudeste a Noroeste). Na extremidades da área de cama, havia uma mureta (0,2 m), que funcionava como um impedimento as correntes de escoamento de ar e, portanto, ocasionava a redução da  $v_{ar,C}$  imediatamente próximo. Por outro lado, na segunda metade da instalação, próximo da face Noroeste, pode-se inferir que o registro de baixas magnitudes de  $v_{ar,C}$  ocorreu devido à ausência de linhas de ventilação, assim como foi observado para  $v_{ar,M}$ .

Os gráficos de distribuição de frequência de  $v_{ar,C}$  estão ilustrados na Figura 4.5.

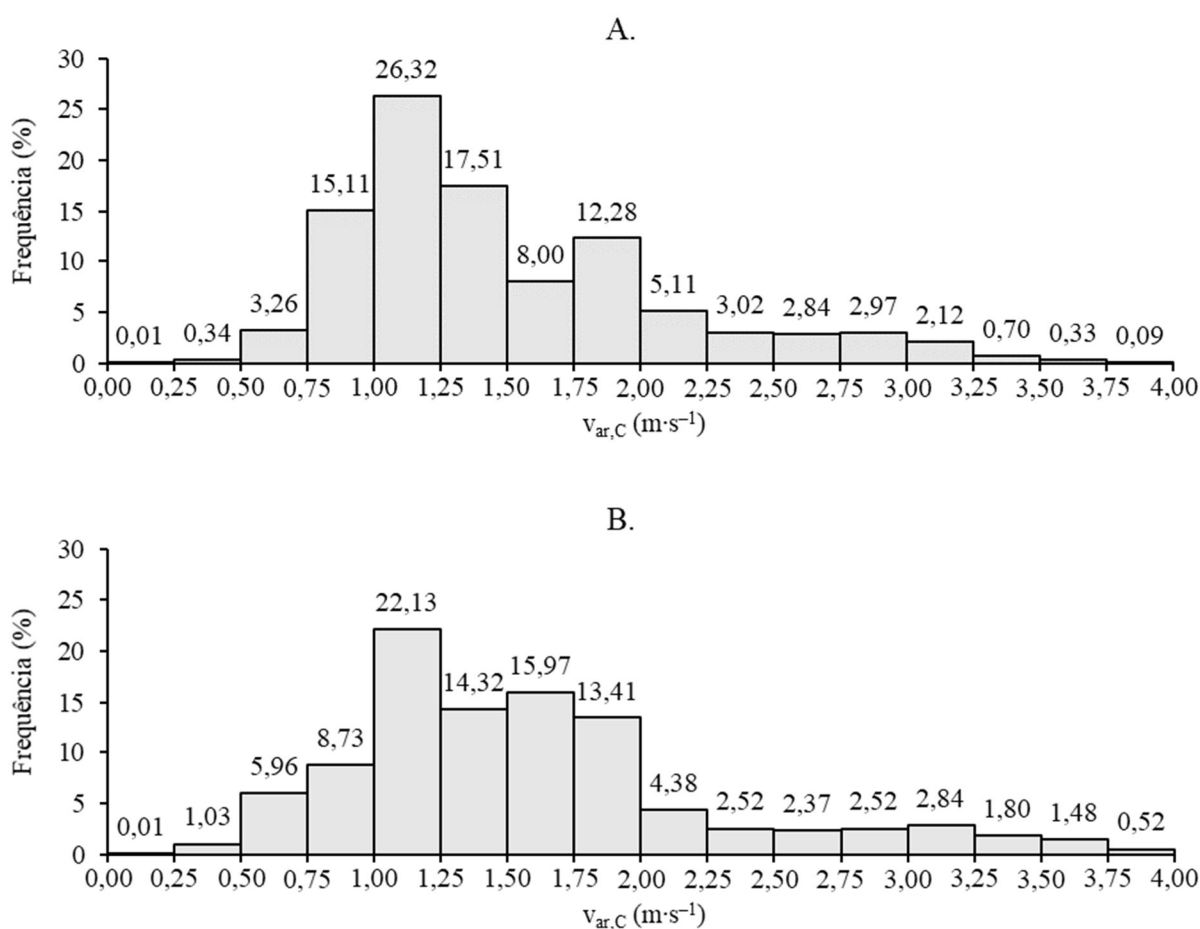


Figura 4.5. Distribuição de frequência de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ): períodos manhã (A) e tarde (B). Fonte: O autor (2022).

Por meio da Figura 4.5, pode-se verificar que a magnitude de  $v_{ar,C}$  foi inferior a  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em cerca de 70,6 e 68,2% da área de cama da instalação, nos períodos manhã e tarde, respectivamente. Apesar das porcentagens de área com  $v_{ar,C}$  inferior a MCARS terem sido menores ao nível da cama, nota-se que houve predomínio de locais com baixas magnitudes de  $v_{ar,C}$ . Por meio dos números de  $v_{ar,C}$  apresentados (Figuras 4.4 e 4.5), torna-se evidente que o sistema de ventilação mecânica presente no local não foi capaz de assegurar condições uniformes, constantes e independentes das condições climáticas de distribuição de  $v_{ar,C}$  no interior da instalação, conforme recomendado por Damasceno (2020).

Oliveira et al. (2019) analisaram a variabilidade espacial da velocidade do ar ao nível da cama em sistemas *CB* abertos e com diferentes tipos de ventilação (natural, mecânica de baixo volume a alta rotação – *LVHS* e mecânica de alto volume e baixa rotação – *HVLS*), durante o período de Primavera. No interior do sistema com ventilação do tipo *LVHS* (mesmo deste estudo), os autores observaram que  $v_{ar,C}$  foi inferior a  $2,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em 31,6% da área de cama da instalação, e concluíram que a quantidade e disposição dos equipamentos de ventilação presentes não foram satisfatórios em assegurar condições homogêneas de  $v_{ar,C}$ .

Andrade (2021) avaliou a distribuição espacial de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  na área interna de um sistema *CB* fechado, associado ao resfriamento adiabático evaporativo, durante os períodos de inverno e verão. No período de inverno, a autora observou que a distribuição de  $v_{ar,C}$  teve elevada variabilidade espacial ( $0,9$  a  $1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), e valores de magnitude de  $v_{ar,C}$  abaixo do desejado na área interna deste tipo de instalação. Os resultados de  $v_{ar,C}$  retratados no citado trabalho corroboram com os alcançados neste estudo, em que a  $v_{ar,C}$  foi predominantemente inferior a  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (Figuras 4.4 e 4.5).

De fato, por meio dos resultados retratados (Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5), pode-se concluir que a quantidade e distribuição de ventiladores *LVHS* ao longo do sistema *CBAVP* não atenderam a necessidade de ventilação requerida na instalação avaliada. Deste modo, é recomendável que o sistema de ventilação empregado seja redimensionado, alterando a quantidade e disposição de equipamentos ao longo da área da instalação, de modo a promover condições uniformes de distribuição de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$ , e assegurar condições adequadas para secagem da cama, remoção de gases e favorecimento das trocas térmicas.

#### 4.4 CONCLUSÕES

A aplicação das técnicas de geoestatística permitiu verificar e caracterizar a ocorrência de dependência espacial das variáveis velocidade do ar na altura de  $1,5 \text{ m}$  ( $v_{ar,M}$ , em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ , em  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) na área interna do sistema avaliado (períodos

manhã e tarde). Em ambos os períodos avaliados, foi observada ocorrência de forte dependência espacial, viabilizando a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem ordinária e geração de mapas de distribuição espacial.

Por meio dos mapas gerados, observou-se que as variáveis apresentavam elevada variabilidade espacial ao longo da área interna da instalação. Em ambos os horários avaliados, as distribuições de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  não foram uniformes, sendo registradas magnitudes de velocidade do ar entre 0,2 e 2,8  $m \cdot s^{-1}$  na altura de 1,5 m, e entre 0,0 e 4,0  $m \cdot s^{-1}$  ao nível da cama. Nas duas alturas em que foram mensurados dados, e em ambos os horários avaliados, as magnitudes de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  foram inferiores ao recomendado pela literatura (1,8  $m \cdot s^{-1}$ ) em mais de 65,0% da área interna da instalação. Níveis adequados de ventilação foram observados apenas nos primeiros 20,0 m da instalação, de Sudeste a Noroeste, como resultado das linhas de ventiladores presentes nesta região.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G.L.P.; PANDORFI, H.; GUISELINI, C.; ALMEIDA, G.A.P.; MORRIL, W.B.B. Investimento em climatização na pré-ordenha de vacas girolando e seus efeitos na produção de leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.1337–1344, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010001200013.
- ANDRADE, R.R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas compost barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Viçosa.
- ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; FREITAS, L.C.S.R.; FERREIRA, C.F.S.; BARBARI, M.; BAPTISTA, F.J.F.; COELHO, D.J.R. Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, v.23, p.103111, 2021. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103111.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. 1.ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003. 165p.
- BERMAN, A. Increasing heat stress relief produced by coupled coat wetting and forced ventilation. **Journal of Dairy Science**, v.91, p.4571–4578, 2008. DOI: 10.3168/jds.2008-1175.
- BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; BEWLEY, J.M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v.96, p.8060–8074, 2013. DOI: 10.3168/jds.2013-6778.
- CALDATO, E.M.R.; CALDATO, A.; MARCONDES, M.I.; ROTTA, P.P. **Manual técnico de construção e manejo de Compost Barn para vacas leiteiras**. 1.ed. Viçosa: Editora UFV, 2020. 35p.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777–783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501–1511, 1994. DOI: 10.2136/SSSAJ1994.03615995005800050033X.

CURI, T.M.R.C.; CONTI, D.; VERCELLINO, R.A.; MASSARI, J.M.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R. Positioning of sensors for control of ventilation systems in broiler houses: a case study. **Scientia Agricola**, v.74, p.101–109, 2017. DOI: 10.1590/1678-992X-2015-0369.

DAMASCENO, F.A. **Compost Barn como uma alternativa para a pecuária leiteira**. 1.ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396p.

FAGUNDES, B.; DAMASCENO, F.A.; ANDRADE, R.R.; SARAZ, J.A.O.; BARBARI, M.; VEGA, F.A.O.; NASCIMENTO, J.A.C. Comparison of airflow homogeneity in compost dairy barns with different ventilation systems using the CFD model. **Agronomy Research**, v.18, p.788–796, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.106.

FARIA, F.F.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MATARAZZO, S.V. Variabilidade espacial do microclima de um galpão utilizado para confinamento de bovinos de leite. **Ciência Rural**, v.38, p.2498–2505, 2008. DOI: 10.1590/S0103-84782008000900013.

FERRAZ, P.F.P.; FERRAZ, G.A.S.; DAMASCENO, F.A.; MOURA, R.S.; SILVA, M.A.J.G.; RODRIGUES, R.L. Spatial variability of enthalpy in rabbit house with and without ridge vent. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.126–132, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V23N2P126-132.

FERRAZ, P.F.P.; GONZALEZ, V.C.; FERRAZ, G.A.S.; DAMASCENO, F.A.; OSORIO, J.A.S.; CONTI, L. Assessment of spatial variability of environmental variables of a typical house of laying hens in colombia: Antioquia state case. **Agronomy Research**, v.18, p.1244–1254, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.099.

GALAMA, P.J.; OUWELTJES, W.; ENDRES, M.I.; SPRECHER, J.R.; LESO, L.; KUIPERS, A.; KLOPČIČ, M. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.5759–5772, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-17214.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M.A.; DAMASCENO, F.A.; GALAMA, P.; TARABA, J.L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LESO, L.; CONTI, L.; ROSSI, G.; BARBARI, M. Criteria of design for deconstruction applied to dairy cows housing: A case study in Italy. **Agronomy Research**, v.16, p.794–805, 2018. DOI: 10.15159/AR.18.085.

LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. 1.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1978. 368p.

MARCHANT, B.P.; LARK, R.M. Robust estimation of the variogram by residual maximum likelihood. **Geoderma**, v.140, p.62–72, 2007. DOI: 10.1016/J.GEODERMA.2007.03.005.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. 14.ed. Paris: Editions Technip, 1962. v.1 333p.

MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617–639, 1986. DOI: 10.1111/J.1365-2389.1986.TB00392.X.

MEDEIROS, B.B.L.; MOURA, D.J. DE; MASSARI, J.M.; CURI, T.M.R. DE C.; MAIA, A.P.D.A. Uso da geoestatística na avaliação de variáveis ambientais em galpão de suínos criados em sistema “wean to finish” na fase de terminação. **Engenharia Agrícola**, v.34, p.800–811, 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000500001.

MEE, J.F.; BOYLE, L.A. Assessing whether dairy cow welfare is “better” in pasture-based than in confinement-based management systems. **New Zealand Veterinary Journal**, v.68, p.168–177, 2020. DOI: 10.1080/00480169.2020.1721034.

MONDACA, M.R.; CHOI, C.Y.; COOK, N.B. Understanding microenvironments within tunnel-ventilated dairy cow freestall facilities: Examination using computational fluid dynamics and experimental validation. **Biosystems Engineering**, v.183, p.70–84, 2019. DOI: 10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2019.04.014.

NÄÄS, I.A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 1989. 183p.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; VEGA, F.A.O.; TITÔCO, I.F.F.; ANDRADE, R.R. Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, p.20200384, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120200384.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, P.F.P.; NASCIMENTO, J.A.C.; FERRAZ, G.A.S.; BARBARI, M. Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, v.17, p.783–796, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.116.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J.; CRUZ, V.F.; SOUZA, S.R.L.; LIMA, K.A.O.; MENDES, A.S. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciência Rural**, v.39, p.1492–1498, 2009. DOI: 10.1590/S0103-84782009005000094.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.5, p.97–105, 2017.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C.; RANKRAPE, F.; VISMARA, E.S. Diurnal behaviors and herd characteristics of dairy cows housed in a compost-bedded pack barn system under hot and humid conditions. **Animal**, v.13, p.399–406, 2019. DOI: 10.1017/S1751731118001088.

PINHEIRO, A.C.; SARAIVA, E.P.; SARAIVA, C.A.S.; FONSECA, V. DE F.C.; ALMEIDA, M.E.V.; SANTOS, S.G.G.C.; AMORIM, M.L.C.M.; RODRIGUES NETO, P.J. Características anatomofisiológicas de adaptação de bovinos leiteiros ao ambiente tropical. **Agropecuária Técnica**, v.36, p.280–293, 2015. DOI: 10.25066/agrotec.v36i1.22280.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R News**, v.1, p.14–18, 2001.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L.G.; SILVA, F.F.; ALVES, M.C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.108, p.1–7, 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0507-8.

VALENTE, D.A.; SOUZA, C.F.; ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; SOUSA, F.C.; ROSSI, G. Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, v.18, p.1547–1555, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.103.

VASCONCELOS, J.L.M.; DEMÉTRIO, D.G.B. Manejo reprodutivo de vacas sob estresse calórico. **Revista Brasileira de Zootecnia**, p.396–401, 2011.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVARES, V.H.; SCHAEFFER, C.E.G.R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. 1.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.1–53.

VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P.; GONZÁLEZ, A.P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v.69, p.97–105, 2010a. DOI: 10.1590/S0006-87052010000500011.

VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P.; CEDDIA, M.B.; GONZÁLEZ, A.P. Detrending non stationary data for geostatistical applications. **Bragantia**, v.69, p.01–08, 2010b. DOI: 10.1590/S0006-87052010000500002.

WARRICK, W.A.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319–344.

## 5 CAPÍTULO IV

### VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICOS DA CAMA EM INSTALAÇÃO *COMPOST BARN* ABERTA COM VENTILAÇÃO POR PRESSÃO POSITIVA EM CONDIÇÕES DE INVERNO

**RESUMO:** Objetivou-se com este estudo avaliar e caracterizar se as variáveis temperatura, umidade e pH da cama, bem como velocidade do ar ao nível da cama, possuem dependência e variabilidade espacial em relação a área interna de uma instalação de confinamento de bovinos de leite em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*), durante o período de inverno. O estudo foi conduzido em três semanas consecutivas do mês de julho de 2021, em um sistema *CBAVP* localizado na região da Zona da Mata, Minas Gerais, Brasil. A área de cama (mistura de maravalha e serragem de madeira, espessura de 0,6 m e cerca de quatro meses de uso) foi dividida em uma malha composta por 44 pontos equidistantes, onde foram coletados dados de temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), bem como velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ). Nos mesmos pontos, foram coletadas amostras de cama, utilizadas para determinação da umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ), e pH da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ). Para avaliar o comportamento espacial das variáveis, foram aplicadas técnicas de geoestatística. A partir dos resultados, foi verificada ocorrência de forte dependência espacial para todas as variáveis, viabilizando a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem e geração de mapas de distribuição espacial. A partir dos mapas, foi possível observar que as variáveis  $t_{C-sup}$ ,  $t_{C-20}$ ,  $U_{C-sup}$ ,  $U_{C-20}$  e  $v_{ar,C}$  apresentaram elevada variabilidade espacial ao longo da área de cama, ao passo que  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  tiveram baixa variação (8,2–9,7). A  $t_{C-sup}$  foi inferior a 20,0 °C (14,1–19,6 °C), caracterizando condição de conforto para os animais permanecerem deitados. Contudo, na região próxima ao corredor de alimentação os valores de  $U_{C-sup}$  foram altos (> 60,0%), condição esta propícia a ocorrência de problemas de sanidade e qualidade do leite. A 0,2 m, observou-se ocorrência de valores de  $t_{C-20}$  inferiores a 40,0 °C (87,0% da área) e de  $U_{C-20}$  acima de 60,0% (49,0% da área), indícios de que o processo de decomposição da cama estava ocorrendo de forma lenta, conforme verificado por meio dos elevados valores de pH (> 9,0). Em relação a  $v_{ar,C}$ , verificou-se a ocorrência de distribuição não uniforme e magnitudes de velocidade inferiores a 1,8 m·s<sup>-1</sup> em cerca de 70,0% da área. Níveis adequados de ventilação foram observados apenas nos primeiros 20,0 m da instalação, de Sudeste a Noroeste, como resultado das linhas de ventiladores presentes nesta região.

**Palavras-chave:** bovinos de leite, sistemas de confinamento, compostagem, qualidade da cama, geoestatística

## **SPATIAL VARIABILITY OF PHYSICAL BED ATTRIBUTES IN OPEN COMPOST BARN INSTALLATION WITH POSITIVE PRESSURE VENTILATION IN WINTER CONDITIONS**

**ABSTRACT:** The objective of this study was to evaluate and characterize whether the variables temperature, humidity, and pH of the bed, as well as air velocity at bed level, have dependence and spatial variability in relation to the internal area of a feedlot facility of milk cattle in production, in an open Compost Barn system with positive pressure ventilation (CBAVP), during the winter period. The study was conducted in three consecutive weeks in July 2021, in a CBAVP system located in the Zona da Mata region, Minas Gerais, Brazil. The bedding area (mixture of wood shavings and sawdust, thickness of 0.6 m and about four months of use) was divided into a mesh composed of 44 equidistant points, where data were collected on the bedding surface temperature ( $t_{C-sup}$ ) and at a depth of 0.2 m ( $t_{C-20}$ ), as well as air velocity at bed level ( $v_{ar,C}$ ). At the same points, samples of litter were collected, used to determine the bed humidity at the surface ( $U_{C-sup}$ ) and at a depth of 0.2 m ( $U_{C-20}$ ), and bed pH at the surface ( $pH_{C-sup}$ ) and at the depth of 0.2 m ( $pH_{C-20}$ ). To evaluate the spatial behavior of the variables, geostatistical techniques were applied. From the results, it was verified the occurrence of strong spatial dependence for all variables, enabling the application of kriging interpolation techniques and the generation of maps of spatial distribution. From the maps, it was possible to observe that the variables  $t_{C-sup}$ ,  $t_{C-20}$ ,  $U_{C-sup}$ ,  $U_{C-20}$  and  $v_{ar,C}$  presented high spatial variability along the bedding area, while  $pH_{C-sup}$  and  $pH_{C-20}$  had low variation (8.2–9.7). The  $t_{C-sup}$  was lower than 20.0 °C (14.1–19.6 °C), characterizing a comfortable condition for the animals to remain lying down. However, in the region close to the feeding alley, the  $U_{C-sup}$  values were high (> 6.00%), a condition that favors the occurrence of health problems and milk quality. At 0.2 m,  $t_{C-20}$  values below 40.0 °C (87.0% of the area) and  $U_{C-20}$  values above 60.0% (49.0% of the area) were observed, evidence that the bed decomposition process was occurring slowly, as verified by the high pH values (> 9.0). In relation to  $v_{ar,C}$ , it was verified the occurrence of non-uniform distribution and velocity magnitudes lower than 1.8 m·s<sup>-1</sup> in about 70.0% of the area. Adequate ventilation levels were observed only in the first 20.0 m of the installation, from Southeast to Northwest, because of the fan lines present in this region.

**Keywords:** dairy cattle, confinement systems, composting, bed quality, geostatistics

## 5.1 INTRODUÇÃO

Em regiões de climas tropical e subtropical, como é o caso do Brasil, a criação de bovinos especializados em produção de leite, geralmente oriundos de países de climas temperados, constitui atividade particularmente desafiadora, uma vez que as condições de altas temperaturas influenciam negativamente o desempenho produtivo e reprodutivo dos animais (Pinheiro et al., 2015; Valente et al., 2020). Por este motivo, o confinamento dos bovinos leiteiros em instalações constitui uma das estratégias prioritárias utilizadas quando se busca melhorar produtividade, qualidade do leite e sanidade do rebanho (Perissinotto & Moura, 2007). O fato é que, ao se restringir os animais em uma área protegida, facilita-se o acondicionamento do ambiente em que estes estão inseridos, podendo-se viabilizar melhores condições térmico-ambientais, melhores índices produtivos, reprodutivos, sanitários e de qualidade do leite, e facilitar o manejo e gerenciamento dos resíduos gerados, com vistas à sustentabilidade (Passetti et al., 2016; Damasceno, 2020; Mee & Boyle, 2020; Andrade et al., 2021).

Na bovinocultura de leite do Brasil, o uso de sistemas de confinamento em instalações livres de baias, que possibilitam melhorar as condições de conforto térmico e assegurar maior liberdade de movimentação dos animais, tem crescido nas últimas décadas (Damasceno, 2020; Galama et al., 2020). Um sistema em ascensão é o *Compost Barn (CB)*, que além de possibilitar melhorias no conforto, produtividade, sanidade e longevidade do rebanho, possui menor custo de implantação e maior apelo ambiental, uma vez que utiliza menos água para carrear dejetos e possibilita a formação de um composto com boas características agrônômicas (Bewley et al., 2017; Damasceno, 2020; Leso et al., 2020; Andrade et al., 2021).

O sistema *CB* consiste no confinamento dos animais em instalações com uma grande área coberta comum de cama em forma de colchão composta por substrato de material orgânico macio e confortável, que, sob determinadas condições, sofre o processo de decomposição ao longo do tempo (Black et al., 2013; Eckelkamp et al., 2016). Neste sistema, o manejo da cama deve assegurar condições superficiais higiênicas e confortáveis aos animais, ao mesmo tempo em que deve possibilitar o fornecimento de condições subsuperficiais propícias ao desenvolvimento dos microrganismos decompositores aeróbios (Lobeck et al., 2011; Black et al., 2013; Pilatti & Vieira, 2017; Damasceno, 2020). Para promover melhorias no processo de secagem da cama, potencializar a atividade dos microrganismos decompositores aeróbios e realizar a incorporação dos dejetos, o material deve ser revolvido e aerado diariamente, de duas a três vezes (Janni et al., 2007; Black et al., 2013; Damasceno, 2020; Leso et al., 2020).

A semi-compostagem da cama em sistemas *CB* é um processo biológico, influenciado por fatores como temperatura, umidade, potencial hidrogeniônico (pH), concentração de nutrientes e aeração do material de cama (Pedrosa et al., 2013; Damasceno, 2020). Deste modo, variáveis como temperatura, umidade, pH da cama e velocidade do ar ao nível da cama devem ser monitoradas e avaliadas frequentemente. Estes parâmetros podem ser utilizados como indicadores da condição térmica e de higiene, quando avaliados na superfície da cama, e de desenvolvimento do processo de compostagem, quando avaliados na camada aerobiamente ativa (0,15 – 0,30 m) (Black et al., 2013; Pedrosa et al., 2013).

De fato, os processos de avaliação e monitoramento do ambiente de cama em sistemas *CB* são importantes, pois podem ser utilizados como base para a adequação do manejo aplicado a cama, considerado como ponto-chave para o sucesso deste sistema (Pilatti & Vieira, 2017; Damasceno, 2020; Leso et al., 2020). Para avaliação e monitoramento da cama, devem ser utilizados métodos computacionais inovadores, tais como a geoestatística, ferramenta que oportuniza avaliar dependência e distribuição espacial e interpretar os resultados a partir da estruturação natural dos dados (Cambardella & Elliott, 1992; Yamamoto & Landim, 2013). O uso desta ferramenta tem se mostrado satisfatório para avaliação de variáveis da cama em sistemas *CB*, possibilitando analisar a distribuição espacial dos parâmetros de interesse de maneira mais precisa (Mota et al., 2019; Silva et al., 2020; Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021; Peixoto et al., 2021; Vieira et al., 2021).

Perante o exposto, objetivou-se com este estudo avaliar e caracterizar se as variáveis temperatura, umidade e pH da cama, bem como velocidade do ar ao nível da cama, possuem dependência e variabilidade espacial em relação a área interna de uma instalação de confinamento de bovinos de leite em produção, em sistema *Compost Barn* aberto com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*), durante o período de inverno.

## **5.2 MATERIAL E MÉTODOS**

Este estudo foi realizado durante o período de três semanas consecutivas, em julho de 2021, no inverno no Brasil. Nesta época, geralmente são observadas condições extremas no que se refere ao manejo do material de cama em sistemas *CB*, em virtude do excesso de umidade na cama e das baixas temperaturas. Estas condições podem comprometer a qualidade do processo de semi-compostagem, causar aumento da sujidade dos animais e acarretar ocorrência de perdas de qualidade do leite.

O estudo foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal Viçosa (Processo 04/2021). Todos os procedimentos descritos foram realizados em conformidade com as diretrizes recomendadas pela citada comissão.

### 5.2.1 Caracterização da instalação *Compost Barn* e das técnicas de manejo

Para a realização deste estudo, foram coletados dados experimentais em um galpão de confinamento de bovinos de leite em lactação, em sistema *Compost Barn* com laterais abertas semiclimatizado com ventilação por pressão positiva (*CBAVP*). A instalação onde foi realizado o estudo pertence a uma propriedade comercial localizada na mesorregião da Zona da Mata Mineira, nas seguintes coordenadas: latitude 20° 46' 41" S; longitude 42° 48' 51" W; e altitude 670 m. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é Cwa: subtropical mesotérmico, com inverno frio e verão chuvoso e quente (Sá Júnior et al., 2012).

O sistema foi construído em julho de 2019, estava orientado no sentido Sudeste-Noroeste e possuía as seguintes características construtivas: 60,0 m de comprimento, 27,6 m de largura, 5,0 m de pé-direito, telhado de duas águas, com estrutura e cobertura metálica, presença de abertura central com sobreposição de 1,0 m, e beiral de 2,2 m. O interior da instalação era composto por 864,0 m<sup>2</sup> de área de cama, 252,0 m<sup>2</sup> de corredor de alimentação, onde estavam instalados quatro bebedouros do tipo basculante, com 2,0 m de comprimento cada, 276,0 m<sup>2</sup> de pista de trato, com comedouro único com 60,0 m de comprimento, e 85,8 m<sup>2</sup> de corredor de serviço, conforme ilustrado na Figura 5.1.

A instalação contava com ventilação por pressão positiva, fornecida por meio de seis ventiladores mecânicos de baixo volume e alta rotação (*LVHS*). Os ventiladores estavam instalados ao longo do comprimento da instalação, sendo dois ventiladores de três hélices, 1,52 m de diâmetro, 1,5 cv de potência e 86.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados na face Sudeste da instalação, e quatro ventiladores de seis hélices, diâmetro de 1,53 m, 2,0 cv de potência e 55.000 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup> de vazão de ar, instalados em pares (cotas 12,0 e 36,0 m, em relação a face Sudeste) (Figuras 5.1 e 5.2A). Os ventiladores estavam instalados a 3,0 m de altura, com inclinação de 45°, e permaneciam ligados 24 h·dia<sup>-1</sup>.

A instalação contava com sistema de iluminação composto por lâmpadas de LED de 100 W (nove na região central da área de cama e nove na região de fronteira entre corredor e pista de alimentação). O acionamento do sistema de iluminação era realizado apenas no período noturno (18h00min às 06h00min).

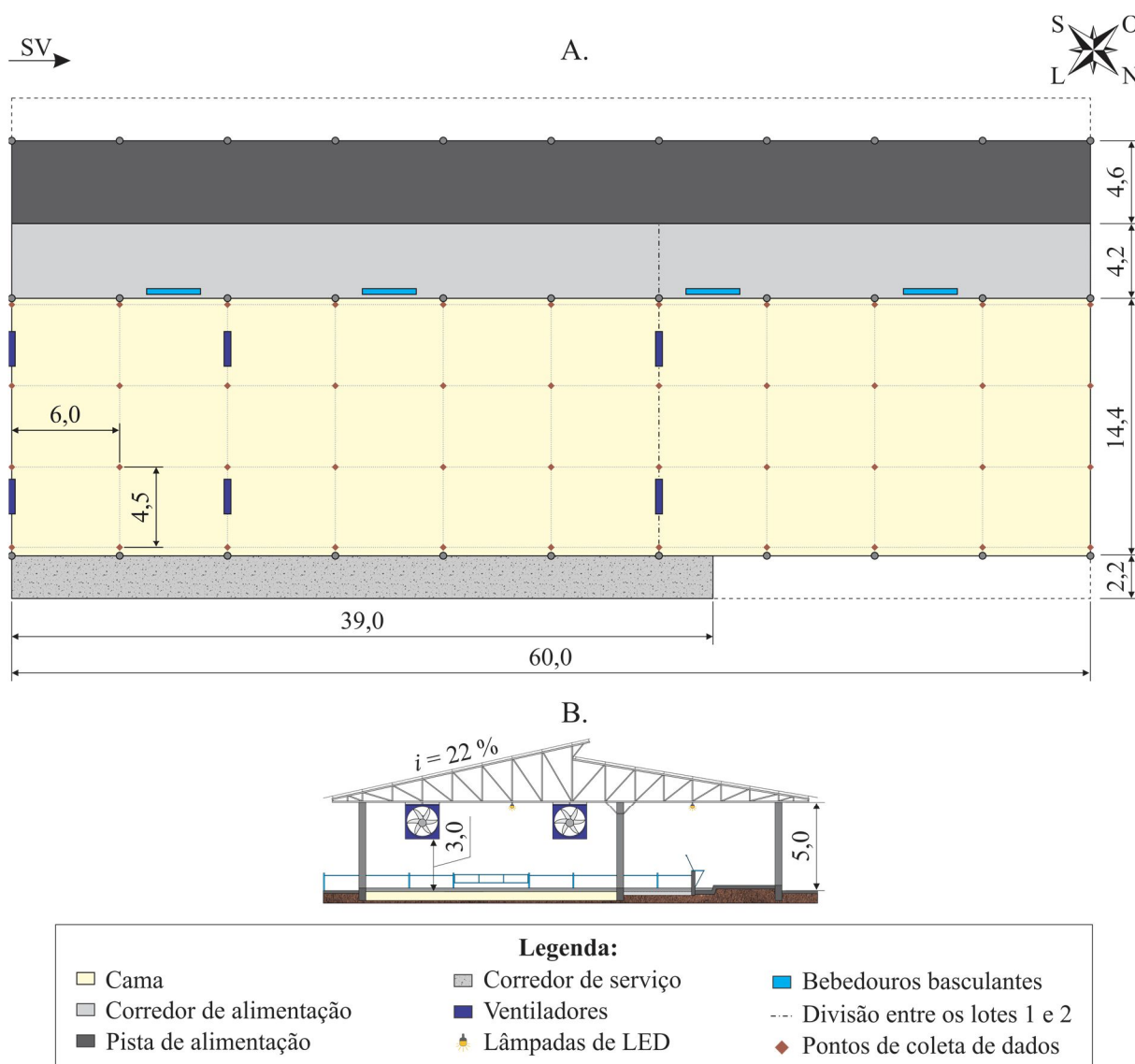


Figura 5.1. Representação esquemática do sistema *Compost Barn* onde foram coletados os dados: planta baixa com pontos de coleta (A) e corte transversal (B). \*SV – sentido da ventilação;  $i$  – inclinação do telhado; medidas em metros (m). Fonte: O autor (2022).

Nas laterais, bem como entre a área de cama e o corredor de alimentação da instalação, existe uma pequena mureta de concreto com 0,2 m de altura, com funções de evitar perdas de material de cama, passagem de material de cama para o corredor de alimentação e/ou de dejetos do corredor de alimentação para a cama. Nos locais onde estavam instalados bebedouros, foram construídas muretas de concreto mais altas (1,2 m), para contenção dos animais, evitando que tivessem acesso a água diretamente da área de cama, o que poderia causar molhamento. Nos corredores de alimentação, de serviço e pista de trato, o piso era de concreto frisado.

No sistema avaliado, o substrato “cama” era constituído por uma mistura de maravalha e serragem de madeira, com espessura de aproximadamente 0,6 m, em forma de colchão, e

tempo de uso de aproximadamente quatro meses (quando o estudo iniciou). Para composição da cama, inicialmente foi adicionada uma camada de 0,3 m de serragem seca, que, em conjunto com dejetos depositados pelos animais (fezes e urina), iniciaram o processo de semi-compostagem. Posteriormente, materiais secos (maravalha e serragem de madeira) foram adicionados, sempre que a umidade da cama se elevava muito, acarretando aumento de sujeira dos animais, excesso de compactação, e consequente situação de anaerobiose no composto. Durante todo o período experimental, foram realizadas apenas reposições de cama com material seco (duas vezes, quando foi observado que a cama estava excessivamente úmida).

Para revolvimento do material de cama era utilizado um implemento híbrido (escarificador de cama com rolo destoroador, 2,0 m de largura de atuação, 5 hastes, 540 rpm de rotação máxima, 0,5 m de profundidade máxima, e 0,3 m de profundidade efetiva), acoplado a um trator (linha leve, 78 cv e 2400 rpm de rotação nominal). O revolvimento era realizado duas vezes ao dia (09h00min e 16h00min), de acordo com rotina padrão da fazenda (Figura 5.2B).



Figura 5.2. Imagens da instalação *Compost Barn* aberta com ventilação por pressão positiva, com destaque para os ventiladores de baixo volume e alta rotação (A) e revolvimento do material de cama (B). Fonte: O autor (2022).

Durante o período experimental, os animais alojados no interior da instalação permaneceram distribuídos em dois lotes (estabelecidos pela fazenda), conforme a produtividade de leite. Os animais com maior produtividade ficavam alojados no Lote 1, que apresentava área de cama de 518,4 m<sup>2</sup> (36,0 x 14,4 m), e estava situado próximo da face Sudeste da instalação. Os animais com menor produtividade permaneceram alojados no Lote 2, que possuía área de cama de 345,6 m<sup>2</sup> (24,0 x 14,4 m) e estava situado próximo a face Noroeste da instalação. Ao longo do período experimental, 80 vacas Holandesas (Puro de Origem – PO,

peso médio de 600 kg, em lactação) ficaram alojadas no interior da instalação [45 no Lote 1 ( $11,5 \text{ m}^2 \cdot \text{animal}^{-1}$ ) e 35 no Lote 2 ( $9,9 \text{ m}^2 \cdot \text{animal}^{-1}$ )].

A rotina padrão de atividades no sistema foi mantida ao longo de todo o período experimental, sendo realizadas duas ordenhas e fornecido volumoso também duas vezes ao dia. As ordenhas iniciavam às 04h00min e às 16h00min, tinham duração média de 2h30min, e eram realizadas em uma sala tipo espinha de peixe 2x6, localizada em anexo. Em todo tempo, as vacas tinham acesso ao corredor de alimentação, onde era fornecido alimento e água (sem restrições). O piso do corredor de alimentação era lavado uma vez ao dia, no período manhã, utilizando sistema conhecido como *flushing*.

### 5.2.2 Caracterização do microambiente térmico no interior da instalação *Compost Barn*

Para caracterização do microambiente térmico, foram coletados dados de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e umidade relativa do ar (UR) no interior da instalação, a cada 5 minutos,  $24 \text{ h} \cdot \text{dia}^{-1}$ , durante todo o período experimental. Os resultados do ambiente térmico foram utilizados como plano de fundo para consecutivas inferências sobre os resultados dos atributos físicos da cama.

Na área de cama da instalação, as coletas de  $t_{bs}$  e UR foram realizados utilizando sensores DHT22 (modelo AM2302; faixa de medição de temperatura de  $-40$  a  $80^\circ\text{C}$  e acurácia de  $0,5^\circ\text{C}$ ; faixa de medição de umidade de 0 a 100% e acurácia de 2%; Aosong Electronics Co. Ltd, Guangzhou, China). Os dados coletados pelos sensores foram processados e armazenados utilizando estações de coleta, que consistiam em uma placa Arduino Uno R3 (microcontrolador ATmega328; tensão de alimentação 5,0 V; velocidade de clock 16 MHz; Atmel Corporation, San Jose, USA), conectada em um Data Logger Shield com RTC e Leitor SD (slot para cartão SD; relógio em tempo Real integrado DS1307; formatação do cartão FAT16 ou FAT32; tensão de alimentação de 3,3 V; Dallas Semiconductor, Dallas, USA) e um Display LCD 16x2 (I2C Backlight Azul, tensão de alimentação 5,0 V; comunicação 4 ou 8 bits; Beijing Qingyun Innovation and Technology Development Co. Ltd., Shenzhen, China), seguindo metodologia adaptada de Freitas et al. (2019). Os sensores foram instalados 2,5 m acima do nível da cama, para possibilitar a passagem do trator utilizado para revolvimento da cama.

Para caracterizar as correntes de ar disponíveis para secagem da camada superficial da cama, foram coletados dados de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ). As coletas foram realizadas sempre no horário manhã (09h00min), duas vezes em cada semana experimental, constituindo seis repetições no tempo. Para coleta dos dados, a área de cama foi dividida em uma malha regular (6,0 x 4,5 m), composta por 44 pontos equidistantes, distribuídos conforme

as características construtivas do sistema (Figura 5.1A). Os dados foram coletados utilizando um anemômetro de fio quente (Instrutherm<sup>®</sup>, modelo TAFR-190, com escala entre 0,1 e 25,0 m·s<sup>-1</sup> e 5% de acurácia). As coletas foram realizadas sempre com a presença dos animais.

### 5.2.3 Caracterização do material de cama

A caracterização do material de cama presente no sistema foi realizada por meio da determinação das variáveis temperatura, umidade e potencial hidrogeniônico (pH) da cama, em superfície e na profundidade de 0,2 m. As coletas de temperatura da cama e de amostras de material de cama para determinação de umidade e pH foram realizadas durante as três semanas experimentais, duas vezes na semana, constituindo-se seis repetições. Os dados e amostras de cama foram coletados imediatamente antes do revolvimento da cama (08h00min às 09h30min), período em que a mesma permaneceu entre 16 e 18 horas sem ser revolvida. As coletas foram realizadas na mesma malha de pontos utilizada para aferição de dados de  $v_{ar,C}$  (Figura 5.1A). Em cada ponto, foram coletados dados de temperatura da cama e amostras de cama, na superfície e na profundidade de 0,2 m.

Para coletas dos dados de temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ), foi empregado um termômetro infravermelho digital (Fluke<sup>®</sup>, modelo 62 MAX, com capacidade de medição de entre -30,0 e 500,0 °C, e acurácia de 1,5%), com distância focal de 1,0 m a emissividade ( $\epsilon$ ) ajustada para 0,9, conforme recomendado por Silva et al. (2020). Para aferições de temperatura da cama na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ) foi utilizado um termômetro de vareta digital (Pyromed<sup>®</sup>, modelo TP101, com escala de -50,0 a 300,0 °C e acurácia de 2%), que foi inserido na cama por cerca de um minuto em cada ponto de coleta, ou até que a sua leitura de temperatura estabilizasse.

Para as determinações dos valores de umidade e pH do material de cama, foram coletadas amostras na mesma malha de pontos utilizada para coletas de dados de temperatura (Figura 5.1A). As coletas foram realizadas na superfície e na profundidade de 0,2 m, utilizando-se uma cavadeira articulada com valores de profundidade demarcados. O material foi coletado pela manhã, imediatamente antes do revolvimento da cama, por duas vezes na semana, nas três semanas experimentais. As amostras coletadas em cada ponto foram acondicionadas em embalagens plásticas hermeticamente fechadas e devidamente identificadas. Após cada coleta, as amostras foram colocadas em caixas isotérmicas e encaminhadas ao Laboratório de Digestão Anaeróbia do Núcleo de Pesquisa em Ambiente e Engenharia de Sistemas Agroindustriais da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

O pH das amostras de cama foi medido em água destilada, utilizando-se 10,0 g de amostra do composto e 25,0 mL de água destilada (razão 1,0:2,5), conforme metodologia descrita por Zhao et al. (2012). Seguindo tal metodologia, o extrato obtido para cada ponto e profundidade foi agitado por 3 a 5 minutos, colocado em repouso por cerca de 30 minutos, após o qual foi realizada a leitura do pH. Para realização das leituras, foi utilizado um pHmêtro digital de bancada (Instrutherm<sup>®</sup>, modelo PH-2600, com escala de medição entre 0,0 e 14,0 e precisão de 0,01), devidamente calibrado (Certificado de Calibração Instrutherm n° 121239/21).

A umidade das amostras de cama foi determinada por meio do método padrão de estufa (gravimétrico), seguindo metodologia descrita por Teixeira et al. (2017). Para cada amostra, 10,0 g de material foram transferidas para recipientes de porcelana devidamente identificados, que tiveram suas massas aferidas, com e sem amostra do material de cama. Na sequência, as amostras foram levadas para estufa a 105,0 °C ( $\pm 5,0$  °C), onde permaneceram por 24 horas ou até atingirem massa constante. Passado este período, as amostras foram retiradas da estufa, transferidas para um dessecador e deixadas em repouso por aproximadamente 30 minutos (até atingirem temperatura ambiente), sendo na sequência medida a massa do recipiente mais massa seca de amostra. Os valores de massa foram tomados utilizando uma balança analítica (Shimadzu<sup>®</sup>, modelo AY220, com capacidade de medição de 220,0 g e precisão de  $\pm 0,0001$  g). A umidade de cada amostra, em porcentagem, foi calculada por meio da razão entre a massa de água retirada e a massa de amostra seca, multiplicada por 100.

## 5.2.4 Análises estatísticas

### 5.2.4.1 Análises de estatística descritiva

Para caracterização do microambiente térmico no interior da instalação, foram calculados valores médios horários e desvio padrão das variáveis temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e umidade relativa do ar (UR). A partir dos dados calculados, foram geradas curvas de comportamento diário destas variáveis.

As variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ), temperatura da cama na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ), umidade da cama na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ), pH da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e pH da cama na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ) foram analisadas inicialmente por meio da estatística descritiva dos dados médios. Deste modo, foram obtidos dados de média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A variabilidade dos dados experimentais foi avaliada por meio da classificação de CV proposta

por Warrick & Nielsen (1980), que considera com baixa dispersão os dados com  $CV < 0,12$ , moderada os dados com  $0,12 \leq CV < 0,24$ , e alta dispersão os dados com  $CV \geq 0,24$ .

#### 5.2.4.2 Análises de geoestatística

O comportamento espacial dos atributos de interesse ( $t_{c-sup}$ ,  $t_{c-20}$ ,  $U_{c-sup}$ ,  $U_{c-20}$ ,  $pH_{c-sup}$  e  $pH_{c-20}$  e  $Var.C$ ) foi analisado por meio do uso das técnicas de geoestatística, que possibilitaram verificar se possuíam dependência e visualizar sua distribuição espacial. As análises foram realizadas utilizando o sistema computacional R Development Core Team (2016), por meio da biblioteca geoR (Ribeiro Júnior & Diggle, 2001).

Utilizando o estimador de Matheron (1962), foram realizados ajustes de semivariogramas (Equação 5.1).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (5.1)$$

Em que:  $\hat{\gamma}(h)$  é a semivariância;

$N(h)$  é o número de pares de observações  $Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$ ;

$Z(X_i)$  e  $Z(X_i + h)$  são as observações experimentais; e

$h$  é a distância que separa as observações experimentais.

Os semivariogramas experimentais foram ajustados utilizando os métodos dos Quadrados Mínimos Ordinários (*Ordinary Least Squares – OLS*) e da Máxima Verossimilhança Restrita (*Restricted Maximum Likelihood – REML*). Foram testados os modelos Esférico, Exponencial e Gaussiano (Equações 5.2, 5.3 e 5.4, respectivamente), conforme retratado por Vieira et al. (2010).

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right) - 0,5 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right], \text{ se } h \leq a \quad (5.2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1, \text{ se } h > a$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left[ 1 - \text{EXP} \left( \frac{-3h}{a} \right) \right] \quad (5.3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \cdot \left\{ 1 - \text{EXP} \left[ -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right] \right\} \quad (5.4)$$

Em que:  $C_0$  é o efeito pepita;

$C_1$  é o patamar; e

$a$  é o alcance.

A avaliação dos ajustes de semivariogramas obtidos foi realizada utilizando procedimentos de validação cruzada, sendo calculados erro médio ( $E_M$ ), desvio padrão do erro médio ( $DP_M$ ), erro reduzido ( $E_R$ ) e desvio padrão do erro reduzido ( $DP_R$ ), conforme detalhado por Ferraz et al. (2020). Para cada variável, foi escolhido o ajuste de semivariograma que apresentou  $E_M$  e  $E_R$  mais próximos de zero, menor  $DP_M$  e  $DP_R$  mais próximo de um, conforme recomendação de Isaaks & Srivastava (1989). A partir dos modelos matemáticos  $\hat{\gamma}(h)$  escolhidos, foram obtidos os coeficientes do modelo teórico do semivariograma, chamados de efeito pepita ( $C_0$ ), contribuição ( $C_1$ ), patamar ( $C_0 + C_1$ ), alcance ( $a$ ) e alcance prático ( $a'$ ).

Para as análises de dependência espacial, foi utilizado o grau de dependência espacial (GDE), obtido por meio da razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C_1$ ). A avaliação do GDE foi realizada utilizando a classificação de Cambardella et al. (1994), que considera: semivariogramas com  $GDE \leq 0,25$  – dependência espacial forte; semivariogramas com  $0,25 < GDE \leq 0,75$  – dependência espacial moderada; e semivariogramas com  $GDE > 0,75$  – dependência espacial fraca.

Após verificada a ocorrência de dependência espacial, foi realizada a interpolação por krigagem ordinária para obtenção dos níveis das variáveis em locais não amostrados na área de cama da instalação. Com base nos dados interpolados, foram gerados mapas de superfície resposta, utilizando-se o programa computacional ArqGIS<sup>®</sup>, versão 10.1, com licença para utilização do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA/UFV). Buscando obter maior detalhamento da distribuição espacial das variáveis, foram calculadas as porcentagens de área ocupadas por cada intervalo e gerados histogramas.

## 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.3.1 Caracterização média horária do microambiente térmico no interior da instalação

Na Figura 5.3 estão ilustradas as curvas horárias dos dados médios registrados durante o período experimental de inverno para temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e umidade relativa do ar (UR), no interior da instalação *Compost Barn* aberta.

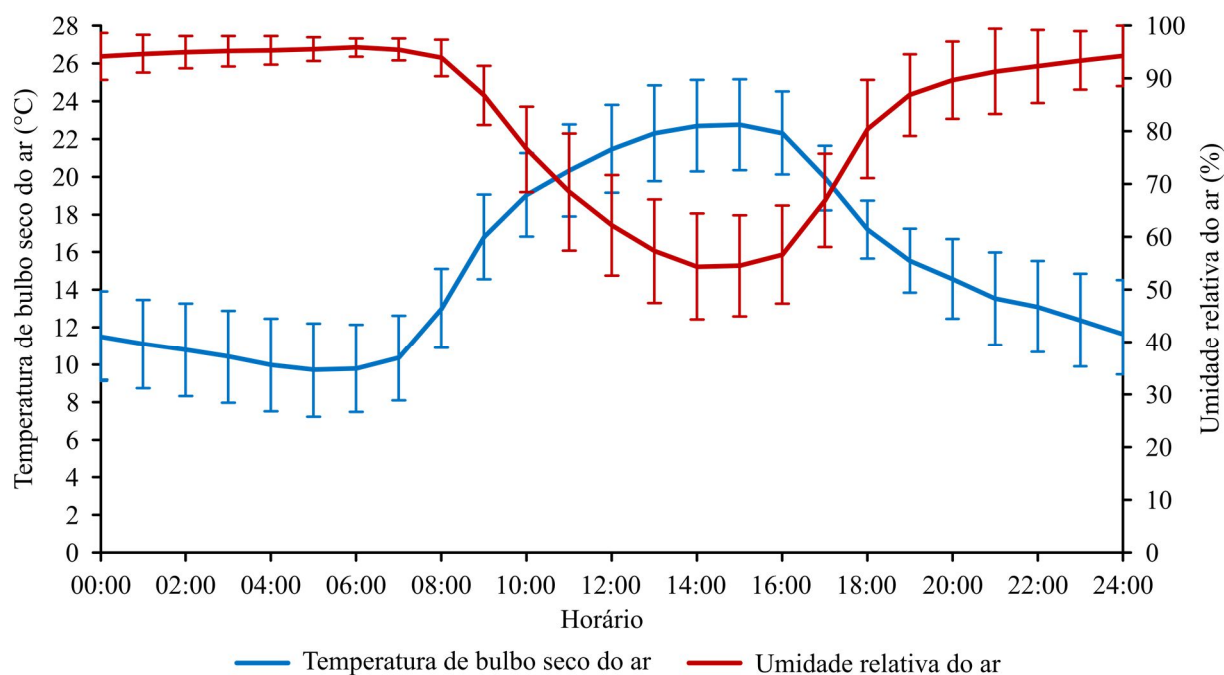


Figura 5.3. Curvas de valores médios horários, com desvio padrão, de temperatura de bulbo seco do ar e umidade relativa do ar ao longo do dia no interior do sistema *Compost Barn*. Fonte: O autor (2022).

Por meio da Figura 5.3, pode-se observar que os valores médios de  $t_{bs}$  no interior da instalação variaram de  $9,7 \pm 2,5$  °C (05h00min) a  $22,8 \pm 2,4$  °C (15h00min). Os valores médios de  $t_{bs}$  mais baixos foram registrados nos períodos madrugada (00h00min às 06h00min), e noite (18h00min às 00h00min), em que a  $t_{bs}$  média foi inferior a 18,0 °C, ao passo que os valores médios mais elevados foram registrados no período tarde (12h00min às 18h00min), em que a  $t_{bs}$  média foi superior a 18,0 °C.

Para a UR, observou-se que a curva dos valores médios horários teve comportamento contrário ao observado para  $t_{bs}$ , com ocorrência de altos valores nos períodos noite e madrugada (18h00min às 06h00min, UR > 80,0%) e valores decrescentes nos períodos manhã e tarde (06h00min às 18h00min, UR ≤ 80,0%). Mesmo durante o dia, os valores médios de UR no interior da instalação mantiveram-se elevados (≥ 60,0%).

### 5.3.2 Caracterização da variabilidade espacial de atributos físicos da cama

Na Tabela 5.1 estão listados os métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas experimentais ajustados (Figura 5.4) para as variáveis  $t_{C-sup}$ ,  $t_{C-20}$ ,  $U_{C-sup}$ ,  $U_{C-20}$ ,  $pHC-sup$ ,  $pHC-20$  e  $Var.C$ .

Tabela 5.1. Métodos, modelos e parâmetros estimados a partir dos semivariogramas ajustados para os valores médios das variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ), pH da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ) e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ), durante o período experimental de inverno.

| Variável     | Método | Modelo    | $C_0$  | $C_1$    | $C_0 + C_1$ | $a$     | $a'$    | GDE    | $E_M$   | $DP_M$  | $E_R$   | $DP_R$ |
|--------------|--------|-----------|--------|----------|-------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|
| $t_{C-sup}$  | REML   | Gaussiano | 0,0000 | 2,8010   | 2,8010      | 6,6460  | 11,5038 | 0,0000 | -0,0774 | 0,8309  | -0,0479 | 1,0218 |
| $t_{C-20}$   | REML   | Gaussiano | 0,0000 | 76,6540  | 76,6540     | 6,4740  | 11,2061 | 0,0000 | -0,4229 | 4,3183  | -0,0477 | 0,9759 |
| $U_{C-sup}$  | REML   | Esférico  | 0,0000 | 274,2200 | 274,2200    | 10,2400 | 10,2387 | 0,0000 | -0,2836 | 14,1767 | -0,0104 | 0,9928 |
| $U_{C-20}$   | REML   | Esférico  | 0,0000 | 248,1420 | 248,1420    | 9,9570  | 9,9571  | 0,0000 | -0,1750 | 13,8022 | -0,0066 | 1,0018 |
| $pH_{C-sup}$ | REML   | Esférico  | 0,0165 | 0,0527   | 0,0692      | 27,5256 | 27,5256 | 0,2384 | -0,0053 | 0,2053  | -0,0139 | 1,0618 |
| $pH_{C-20}$  | REML   | Esférico  | 0,0000 | 0,1079   | 0,1079      | 8,6834  | 8,6834  | 0,0000 | -0,0078 | 0,3130  | -0,0130 | 1,0251 |
| $v_{ar,C}$   | REML   | Gaussiano | 0,0000 | 0,6892   | 0,6892      | 6,0831  | 10,5288 | 0,0000 | -0,0120 | 0,4273  | -0,0116 | 0,8959 |

\*  $C_0$  – efeito pepita;  $C_1$  – contribuição;  $C_0 + C_1$  – patamar;  $a$  – alcance;  $a'$  – alcance prático; GDE – grau de dependência espacial;  $E_M$  – erro médio;  $DP_M$  – desvio padrão do erro médio;  $E_R$  – erro reduzido;  $DP_R$  – desvio padrão do erro reduzido; e REML – Método da Máxima Verossimilhança Restrita.

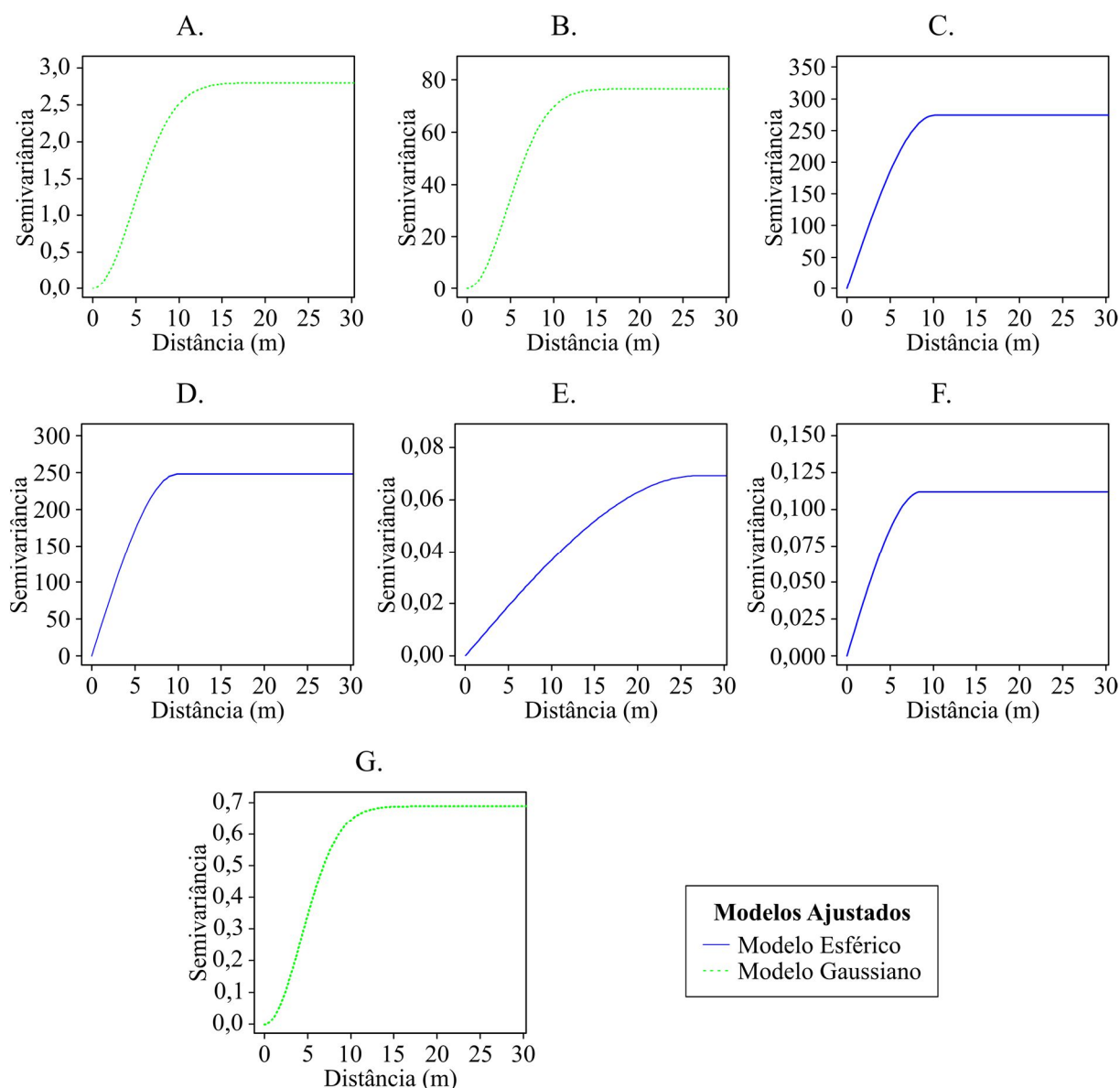


Figura 5.4. Semivariogramas ajustados para as variáveis temperatura da cama na superfície –  $t_{C-sup}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $t_{C-20}$  (B), umidade da cama na superfície –  $U_{C-sup}$  (C) e na profundidade de 0,2 m –  $U_{C-20}$  (D), pH da cama na superfície –  $pH_{C-sup}$  (E) e na profundidade de 0,2 m –  $pH_{C-20}$  (F), e velocidade do ar ao nível da cama –  $var_{ar,C}$  (G). Fonte: O autor (2022).

Conforme pode-se observar por meio da Tabela 5.1, para todas as variáveis avaliadas os melhores ajustes foram obtidos utilizando o Método da Máxima Verossimilhança Restrita (REML). Este método tem sido empregado para ajustes de pequenos agrupamentos de dados, como os comumente encontrados na área de ambiência animal, pois resulta em estimativas menos enviesadas (Marchant & Lark, 2007; Ferraz et al., 2019).

Para as variáveis  $U_{C-sup}$ ,  $U_{C-20}$ ,  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$ , os melhores ajustes de semivariogramas experimentais foram obtidos utilizando o modelo Esférico, ao passo que para  $t_{C-sup}$ ,  $t_{C-20}$  e  $Var_C$  o modelo Gaussiano retornou melhores ajustes (Tabela 5.1). Ambos os modelos são adequados para descrever a variabilidade espacial dos dados destas variáveis, uma vez que suas funções são positivas condicionais, condição esta que garante que as variâncias calculadas também foram positivas (McBratney & Webster, 1986; Vieira et al., 2010a). A adequação dos modelos citados para descrever a variabilidade espacial das variáveis foi reforçado pelos dados obtidos via validações cruzadas, em que foram observados valores de  $E_M$  e  $E_R$  próximos de zero ( $< 0,01$ ) e de  $DP_R$  muito próximos de um. Estes resultados corroboram com os descritos por Silva et al. (2020), Andrade et al. (2021), Oliveira et al. (2021) e Peixoto et al. (2021), que ao estudarem a distribuição espacial de variáveis da cama em sistemas *CB*, também obtiverem melhores ajustes com uso dos modelos Esférico e Gaussiano.

De acordo com Ferraz et al. (2017a), um dos principais parâmetros da geoestatística é o efeito pepita ( $C_0$ ), que se refere a variabilidade não explicada, considerando a distância entre pontos amostrados. Para todas as variáveis, os valores de  $C_0$  foram baixos (próximos ou iguais a zero), indício de que possuíam baixa variabilidade não explicada, e que os semivariogramas ajustados não tinham descontinuidade (Tabela 5.1 e Figura 5.4). Apenas para a variável  $pH_{C-sup}$  foi obtido valor de  $C_0$  diferente de zero, mas baixo, quando avaliada em relação ao patamar.

O  $C_0$  pode ser atribuído a diversos fatores, tais como erros de coletas e/ou análises, variações locais etc. Como não é possível quantificar de forma direta e individual a contribuição de cada fator, é importante que sejam utilizadas outras formas de avaliação (Trangmar et al., 1986). Uma das formas mais comuns é por meio do Grau de Dependência Espacial (GDE), que expressa o  $C_0$  em relação ao patamar ( $C_0 + C_1$ ), e possibilita realizar comparações, por meio da classificação proposta por Cambardella et al. (1994).

Utilizando o GDE para avaliar a contribuição de  $C_0$  na composição do  $C_0 + C_1$ , observa-se que os valores obtidos foram inferiores a 0,25 (Tabela 5.1). Portanto, houve ocorrência de forte dependência espacial para todas as variáveis avaliadas, sendo que apenas para  $pH_{C-sup}$  foi obtido valor de GDE diferente de zero (0,2384), mas ainda menor que 0,25.

Conforme Curi et al. (2017), os resultados obtidos com o uso das técnicas de interpolação por krigagem são melhores quando obtidas baixas contribuições de efeito pepita para o patamar. Logo, pode-se concluir que os resultados alcançados com uso das técnicas de krigagem representaram de maneira satisfatória os atributos estudados, bem como que as condições de cama não eram homogêneas na área de cama do sistema *CBAVP* avaliado, conforme sugerido por Andrade et al. (2021).

Em geoestatística, outro parâmetro de elevada importância é o alcance ( $a$ ), que é utilizado para determinação do limite de dependência espacial, separando amostras correlacionadas de amostras independentes (Andriotti, 2003; Ferraz et al., 2019). Conforme pode-se verificar por meio da Tabela 5.1, para todos os atributos estudados foram obtidos valores de  $a$  superiores a menor distância entre pontos de coleta (4,5 m), sendo que o menor  $a$  foi obtido para a variável  $var_C$  (6,0831 m). A ocorrência de valores de  $a$  superiores a distância entre pontos de coleta foi um indicativo de que a malha utilizada era adequada para os fins propostos neste estudo.

Por meio dos modelos e parâmetros dos semivariogramas ajustados para as variáveis (Tabela 5.1), verificou-se que estas não possuíam distribuição aleatória no espaço, uma vez que houve ocorrência de dependência espacial. Logo, foi possível utilizar a krigagem ordinária para prever os níveis das variáveis em locais não amostrados, e confeccionar mapas de distribuição espacial. Na Figura 5.5 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial dos valores médios das variáveis  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$ .

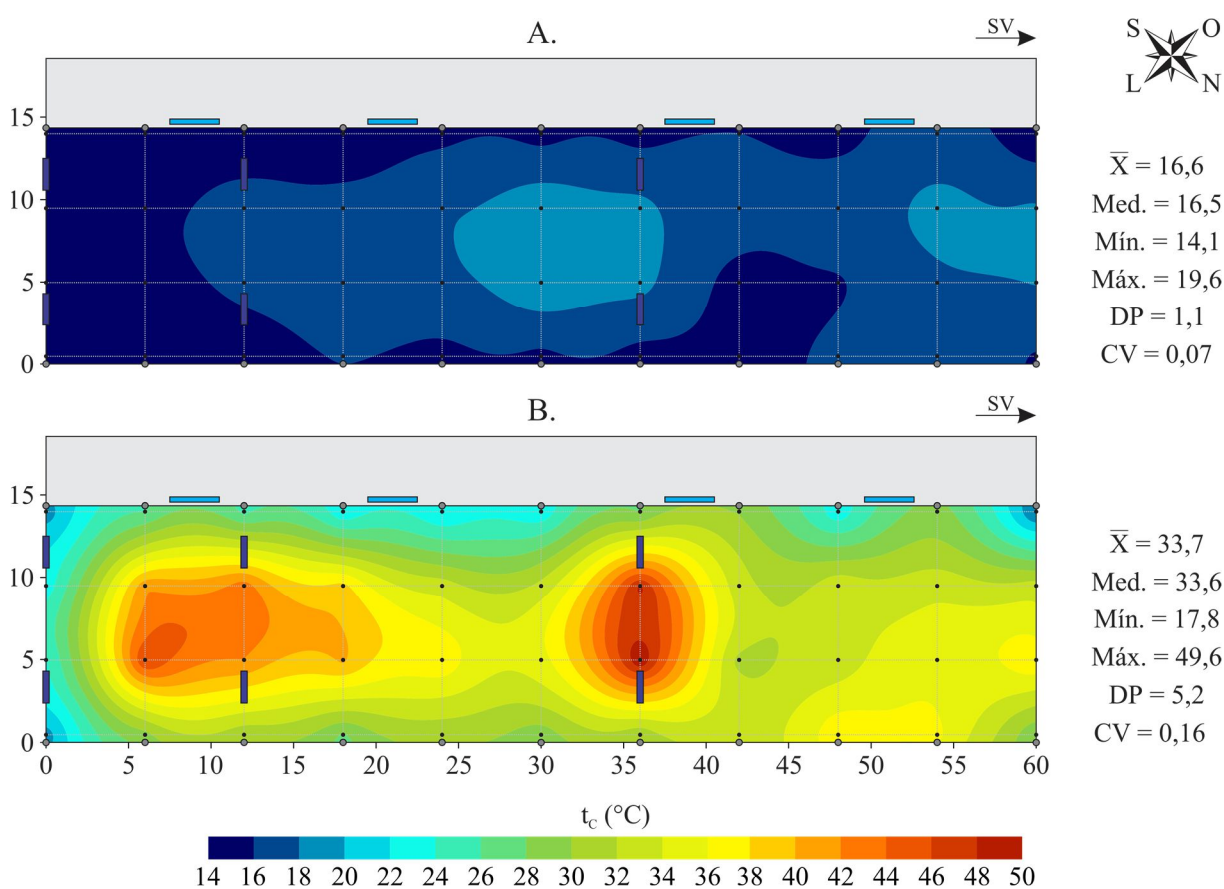


Figura 5.5. Distribuição espacial de temperatura da cama na superfície –  $t_{C-sup}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $t_{C-20}$  (B). \*SV – sentido da ventilação;  $\bar{X}$  – média; Med. – mediana; Mín. – mínimo; Máx. – máximo; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação. Fonte: O autor (2022).

Para  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$  (Figura 5.5), pode-se observar que foram obtidos valores de média ( $\bar{X}$ ) e mediana (Med.) muito próximos, indicativo de que os dados coletados não tinham assimetria acentuada (Little & Hills, 1978). Com base na classificação de CV proposta por Warrick & Nielsen (1980), pode-se observar que a dispersão dos dados de  $t_{C-sup}$  era baixa ( $CV < 0,12$ ), ao passo que para dos dados de  $t_{C-20}$  era moderada ( $0,12 \leq CV < 0,24$ ). Estes resultados  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$  vão de encontro com os retratados por Andrade (2021), que ao avaliar um sistema *CB* fechado (ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático evaporativo) durante o período de inverno (antes do revolvimento da cama), relatou a ocorrência de dados de  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$  com baixa e moderada dispersão, respectivamente.

Conforme Eckelkamp et al. (2016), a temperatura superficial da cama em sistemas *CB* é influenciada pelo ambiente e, portanto, aumenta ou diminui de acordo com os níveis de temperatura de bulbo seco do ar registrados. Na superfície da cama, a ventilação retira calor, por meio da evaporação de parte da água ali presente, e faz com que sejam observados valores de  $t_{C-sup}$  próximos aos do ambiente (Black et al., 2013; Llonch et al., 2020). Considerando o que foi afirmado pelos autores, pode-se avaliar a  $t_{C-sup}$  com base na temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ), cuja curva de variação horária está ilustrada na Figura 5.3. Durante o período em que foram realizadas as coletas de  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$  (08h00min às 10h00min), foram registrados valores médios de temperatura de bulbo seco do ar entre  $13,0 \pm 2,1$  °C e  $19,0 \pm 2,2$  °C. Portanto, por meio do registro de valores médios de  $t_{C-sup}$  entre 14,1 e 19,6 °C ao longo da área de cama (Figura 5.5A), pode-se constatar que este atributo estava diretamente relacionado com a  $t_{bs}$ .

Resultados de  $t_{C-sup}$  semelhantes aos alcançados neste trabalho foram observados por Andrade et al. (2021), que avaliaram um sistema *CB* fechado climatizado via ventilação por pressão negativa associada ao resfriamento adiabático, durante os períodos de inverno e verão, sempre pela manhã. No período de inverno, os autores reportaram que foram registrados valores médios de  $t_{C-sup}$  entre 13,8 e 17,8 °C, com maiores níveis observados na região central da cama.

Segundo Janni et al. (2007), a  $t_{C-sup}$  é importante do ponto de vista de conforto térmico, haja vista que a atividade dos microrganismos decompositores é inexistente ou muito baixa na superfície da cama. Por este motivo, recomenda-se que os níveis de  $t_{C-sup}$  sejam mantidos dentro da faixa de termoneutralidade para bovinos leiteiros em lactação ( $4,0 \leq t_{C-sup} < 24,0$  °C) (Nääs, 1989), assegurando fornecimento de superfície termicamente confortável. Por meio da Figura 5.5, observa-se que os níveis médios de  $t_{C-sup}$  registrados durante o período experimental de inverno (08h00min às 09h30min) foram inferiores ao limiar superior de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação (24,0 °C). De acordo com Almeida et al. (2011), sob condições de conforto térmico estes animais permanecem cerca de 50,0% do tempo deitados. Portanto,

pode-se inferir que a  $t_{C-sup}$  durante o período avaliado (manhãs de inverno) estava adequada à permanência dos animais deitados, condição que possibilita reduzir seu gasto energético para manutenção da temperatura do núcleo corporal.

De qualquer modo, observou-se que houve ocorrência de variabilidade espacial de  $t_{C-sup}$  ao longo da área de cama da instalação (variação igual 5,5 °C, Figura 5.5A), com níveis mais baixos registrados na região periférica, especialmente próximo da face Sudeste da instalação ( $t_{C-sup} < 16,0$  °C). Nesta região estavam presentes duas linhas de ventiladores (cotas 0,0 e 12,0 m, de Sudeste a Noroeste), que permaneceram ligados 24 h·dia<sup>-1</sup>. Logo, pode-se inferir que os menores níveis de  $t_{C-sup}$  ocorreram em função das correntes de escoamento de ar geradas pelos ventiladores, que possibilitam resfriar a superfície da cama, conforme Black et al. (2013).

Em contrapartida, na região central e proximidades da face Noroeste da área de cama da instalação foram registrados níveis mais elevados de  $t_{C-sup}$  (Figura 5.5A). Estas regiões coincidem com os locais em que foram registradas baixas magnitudes de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ )(Figura 5.11). Portanto, pode-se inferir que os valores de  $t_{C-sup}$  mais altos observados nesta região são devidos as baixas  $v_{ar,C}$  registradas nestes locais, que não foram efetivas em reduzir o calor na superfície da cama, conforme preconizado por Black et al. (2013) e Llonch et al. (2020).

Apesar dos ventiladores permanecerem ligados 24 h·dia<sup>-1</sup>, sua distribuição ao longo da área de cama da instalação era irregular, inferindo-se que não foi possível assegurar condições homogêneas de  $t_{C-sup}$  (Figura 5.5A). Próximo da face Sudeste da instalação estavam instalados quatro ventiladores (cotas 0,0 e 12,0 m, de Sudeste a Noroeste), mas em todo o restante da área de cama estavam presentes apenas mais dois ventiladores (cota 36,0 m, de Sudeste a Noroeste). Logo, por meio dos resultados ilustrados na Figura 5.5A, pode-se inferir que o número e a disposição dos ventiladores utilizados nesta instalação não foram satisfatórios em promover redução dos valores médios de  $t_{C-sup}$  em toda a área de cama, especialmente em locais mais distantes, como próximo da face Noroeste da instalação.

Por meio da Figura 5.5B, pode-se observar que ocorreu elevada variabilidade espacial de  $t_{C-20}$  ao longo da área de cama da instalação, em que foram registrados valores médios entre 17,8 e 49,6 °C. Conforme esperado, os valores de  $t_{C-20}$  foram superiores aos observados na superfície da cama. Este é, portanto, um indício de que o processo de decomposição do material estava ocorrendo de forma ativa, uma vez que a atividades dos microrganismos decompositores resulta na produção de calor (Black et al., 2013).

De acordo com Black et al. (2013), a faixa de temperatura desejada na camada aerobiamente ativa de sistemas *CB* (0,15 a 0,30 m) corresponde ao intervalo de 43,0 e 65,0 °C,

sendo que abaixo de 40,0 °C a degradação do material é muito lenta, e acima de 55,0 °C ocorre a eliminação de patógenos. Com base nesta faixa de  $t_{C-20}$ , verificou-se que em expressiva parcela da área de cama os valores médios de  $t_{C-20}$  foram inferiores ao desejado na camada aerobiamente ativa (Figura 5.5B).

Ao longo da área de cama da instalação, os níveis médios de  $t_{C-20}$  mais baixos foram registrados em regiões periféricas (faces Sudeste – extremidade, e Sudoeste – entre a cama e o corredor de alimentação) (Figura 5.5B). Em relação ao registro de baixos valores de  $t_{C-20}$  nestas regiões, duas potenciais justificativas podem ser citadas. A primeira delas é a relativa dificuldade de revolvimento do material de cama nestes locais, em função da proximidade com muretas divisórias. A segunda é o intenso movimento dos animais da área de cama para o corredor de alimentação, onde tinham acesso ao trato e água. Em ambos os casos, infere-se que houve tendência de ocorrência de compactação da camada subsuperficial da cama e, como consequências, redução da concentração de oxigênio, da atividade de decomposição e da produção de calor (El Kader et al., 2007).

Como contraponto, pode-se observar que níveis médios desejados de  $t_{C-20}$  ( $> 40,0$  °C) foram registrados apenas em duas regiões específicas da área central da cama da instalação: entre as duas primeiras linhas de ventilação, e imediatamente abaixo da linha de ventilação três (Figura 5.5B). No primeiro caso, estima-se que a maior taxa de ventilação fornecida ( $86.000 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  de vazão de ar – primeira linha de ventilação) assegurou o suprimento da aeração necessária na região citada. No segundo caso, presume-se que na região abaixo da linha de ventilação três não ocorreu formação de estruturas subsuperficiais compactadas, em virtude da presença da cerca elétrica de divisão entre os lotes 1 e 2, que impedia o trânsito de animais e assegurava que a cama não fosse compactada. Portanto, entende-se que nesta região foi garantido o fornecimento de concentração de oxigênio adequada aos microrganismos decompositores, conforme pode-se verificar por meio dos níveis mais elevados de  $t_{C-20}$  registrados (Figura 5.5B).

Com o objetivo de obter informações numéricas detalhadas sobre as frações de área ocupadas por cada classe dos atributos avaliados, foram gerados gráficos de distribuição de frequência da  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$ , conforme ilustrado na Figura 5.6.

Em toda a área de cama, os valores médios de  $t_{C-sup}$  registrados foram inferiores a 24,0 °C (Figura 5.6A), indício de que as condições superficiais de temperatura da cama foram favoráveis à permanência dos animais deitados. Porém, dada a proximidade entre os valores de  $t_{C-sup}$  e temperatura ambiente ( $t_{bs}$ ) observados neste estudo e retratado por outros autores (Black et al., 2013; Llonch et al., 2020; Andrade et al., 2021; Vieira et al., 2021), pode-se inferir que a

$t_{C-sup}$  não foi adequada para que os animais permanecessem deitados em alguns horários do dia. No período das 13h00min às 16h00min foram registrados valores de  $t_{bs}$  superiores a  $24,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.3). Portanto, estima-se que neste intervalo de tempo a  $t_{C-sup}$  em algumas regiões pode ter sido superior ao limiar de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação.

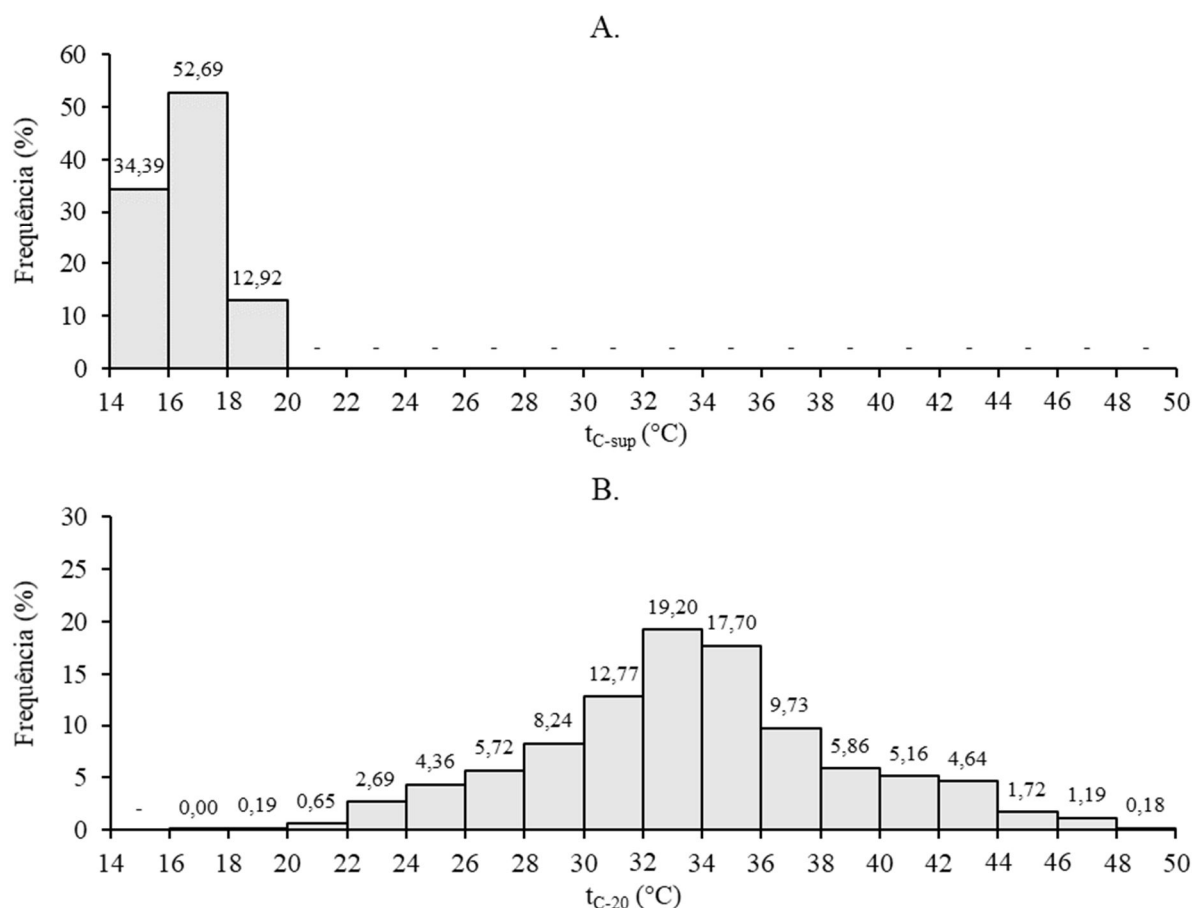


Figura 5.6. Distribuição de frequência de temperatura da cama na superfície –  $t_{C-sup}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $t_{C-20}$  (B). Fonte: O autor (2022).

Em cerca de 87,0% da área da área de cama a  $t_{C-20}$  registrada foi inferior a  $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 5.6B), indício de que o processo de degradação da cama nesta instalação estava ocorrendo de forma lenta, bem como de que o composto obtido ao final do processo de compostagem poderá não ter boas características agrônômicas (Oliveira et al., 2021). Os resultados de  $t_{C-20}$  retratados neste estudo (Figura 5.6B) corroboram com os observados por outros autores que avaliaram a qualidade da cama em sistemas *CB* no Brasil, e observaram a ocorrência de valores de  $t_{C-20}$  inferiores a  $40,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Mota et al., 2019; Oliveira et al., 2019b; Guesine, 2020; Andrade et al., 2021; Vieira et al., 2021).

Na Figura 5.7 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial de umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ).

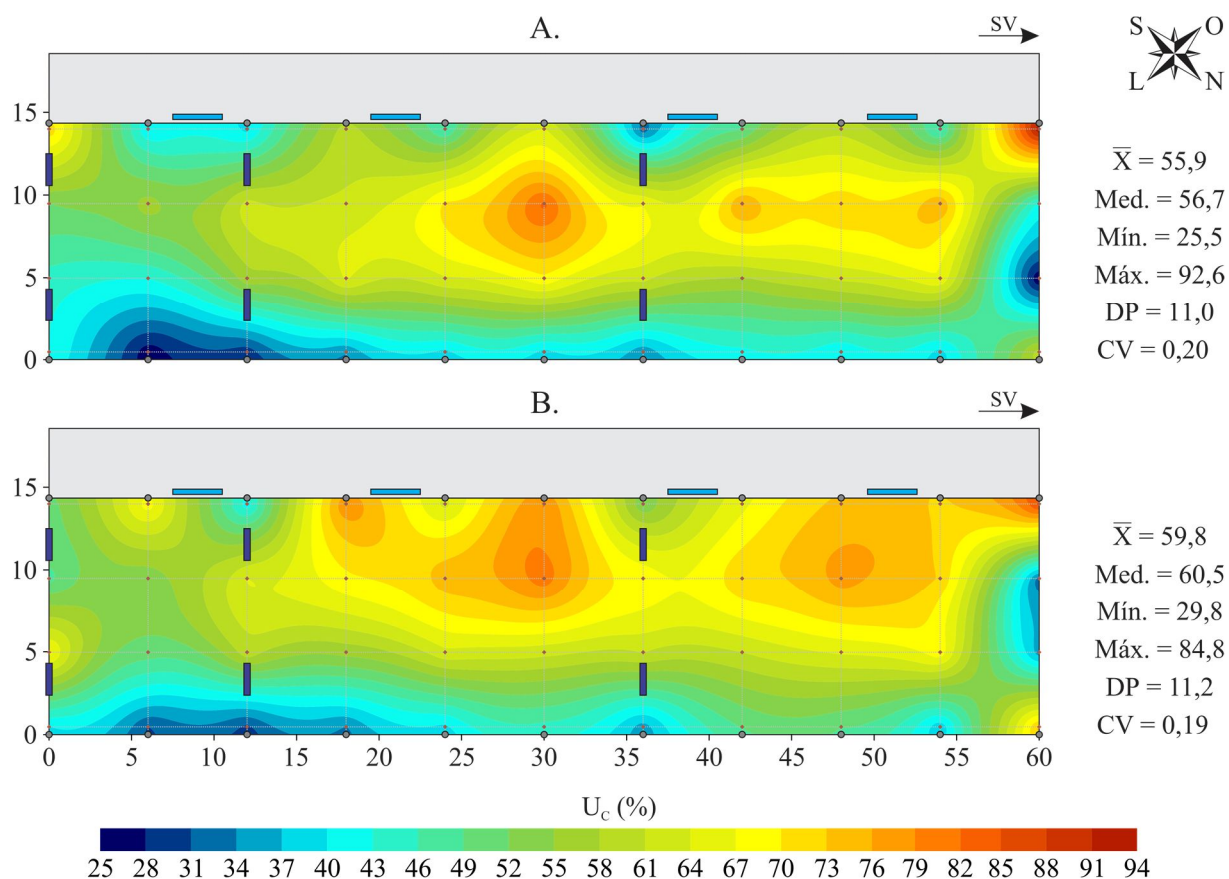


Figura 5.7. Distribuição espacial de umidade da cama na superfície –  $U_{C-sup}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $U_{C-20}$  (B). \*SV – sentido da ventilação;  $\bar{X}$  – média; Med. – mediana; Mín. – mínimo; Máx. – máximo; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação. Fonte: O autor (2022).

De modo semelhante ao que foi verificado para  $t_{C-sup}$  e  $t_{C-20}$  (Figura 5.5), pode-se observar que para  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  foram obtidos valores de média ( $\bar{X}$ ) e mediana (Med.) próximos (Figura 5.7). Portanto, pode-se inferir que as distribuições de dados destas variáveis não tinham assimetria acentuada (Little & Hills, 1978). Em relação a variabilidade dos dados, em ambos os casos foi observada ocorrência de moderada dispersão ( $0,12 \leq CV < 0,24$ ), conforme a classificação sugerida por Warrick & Nielsen (1980).

Foram obtidas distribuições espaciais similares para  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  (Figura 5.7), mas a amplitude de variação foi maior na superfície da cama (67,1% e 55,0%, respectivamente). Provavelmente, este fato ocorreu devido o derrame de água pelos animais após a ingestão e durante a limpeza do corredor de alimentação, bem como deposição de fezes e urina na camada superficial da cama. O registro de dados de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  com elevada variação é um indício de que o sistema de ventilação e o manejo aplicado a cama não estavam assegurando condições homogêneas de umidade ao longo da área de cama da instalação.

As altas amplitudes de variação de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  retratadas neste estudo (Figura 5.7) corroboram com os resultados descritos por Oliveira et al. (2021), que avaliaram um sistema *CB* fechado durante o período de Primavera e observaram amplitudes de variação próximas de 50,0% na superfície da cama e a 0,2 m de profundidade. Por outro lado, diferem dos resultados retratados por Andrade et al. (2021), que também avaliaram a umidade da cama em um sistema *CB* fechado durante o período de Inverno, e obtiveram distribuições espaciais de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  com baixas amplitudes de variação (cerca de 8,0%).

De acordo com Black et al. (2013), os níveis de umidade na cama devem ser mantidos na faixa de 40,0 a 60,0%, para assegurar a manutenção de condições aeróbias e a sobrevivência dos microrganismos decompositores. Como um dos objetivos do uso de sistemas *CB* é fornecer superfície confortável e higiênica para os bovinos leiteiros alojados, a manutenção da umidade da cama abaixo de 60,0% também é importante do ponto de vista de sanidade e qualidade do leite (Leso et al., 2020). No presente estudo, entretanto, foram registrados valores de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  superiores a 60,0%, com níveis mais elevados sempre registrados próximo da face Noroeste e ao longo das proximidades do corredor de alimentação da instalação (Figura 5.7). Próximo do corredor de alimentação, infere-se que houve tendência ao aumento dos níveis de umidade da cama, devido ao derramamento de água pelos animais após a ingestão, respingo de água durante a limpeza do piso do corredor de alimentação e maior deposição de fezes e urina, conforme retratado por Damasceno et al. (2019), Andrade et al. (2021) e Oliveira et al. (2021). Na extremidade Noroeste, em região próxima ao corredor de alimentação, foram registrados valores de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  sempre superiores a 80,0% (Figura 5.7). Neste local, ocorria molhamento da cama, devido o transbordo de água do corredor de alimentação para a área de cama durante a limpeza do piso (*flushing*). No momento de limpeza do piso, ocorria sobrecarga de dejetos e água na calha coletora, acarretando o transbordo. Com vistas a corrigir o citado problema, é recomendável que seja reformada e ampliada a calha coletora de dejetos, bem como construída uma mureta divisória ligeiramente mais alta no local (> 0,2 m).

Mesmo que observada maior deposição de fezes e urina na região próxima ao corredor de alimentação, o sistema de ventilação presente e o manejo da cama deveriam ter sido efetivos em promover a remoção e incorporação da umidade excedente na cama. Portanto, diante dos resultados ilustrados por meio da Figura 5.7, pode-se inferir que o sistema de ventilação e o revolvimento da cama não foram eficientes em promover a secagem uniforme da cama da instalação, dados os elevados níveis de umidade observados.

Na camada superficial ( $U_{C-sup}$ ), a umidade da cama tem maior importância em relação a sanidade, limpeza dos animais e qualidade do leite. Quando está excessivamente úmida, como

foi observado nesta pesquisa (em cerca de 37,0% da área de cama, Figura 5.8A), o material tende a aderir a superfície corporal dos animais, aumentando sua sujidade, risco de mastite e contagem de células somáticas (CCS) (Black et al., 2014).

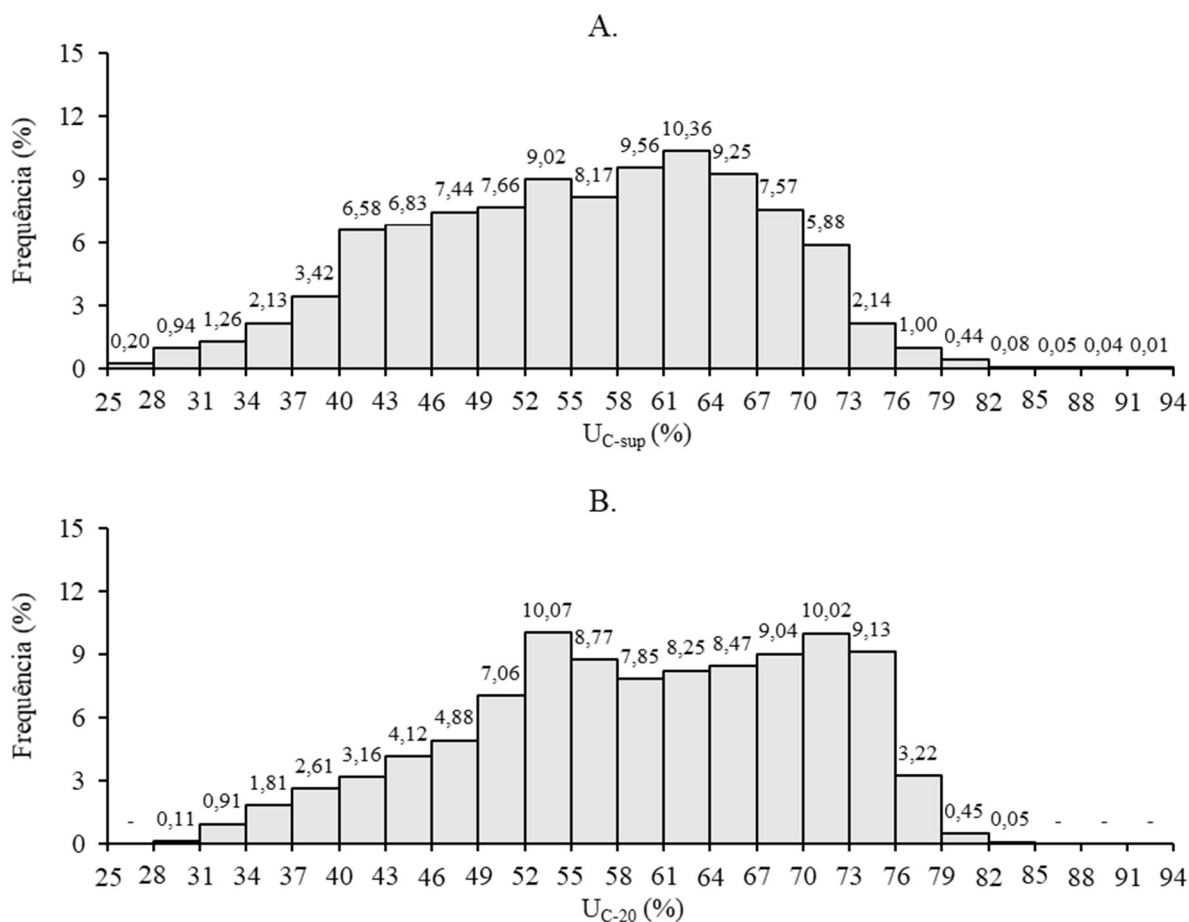


Figura 5.8. Distribuição de frequência de umidade da cama na superfície – U<sub>C-sup</sub> (A) e na profundidade de 0,2 m – U<sub>C-20</sub> (B). Fonte: O autor (2022).

Por outro lado, em regiões periféricas da instalação (faces Nordeste e Noroeste), os valores de U<sub>C-sup</sub> e U<sub>C-20</sub> foram baixos (< 40,0%), o que permite inferir que isto ocorreu devido a secagem excessiva da cama nestes locais, que recebiam incidência de radiação solar direta em alguns horários do dia. De acordo com Oliveira et al. (2021), o registro de regiões com baixos valores de umidade na camada superficial da cama é desejável, e estima-se que a sua ocorrência possibilitará melhores condições de limpeza e sanidade aos animais.

Na camada subsuperficial da cama, a manutenção de U<sub>C-20</sub> em níveis adequados é importante para o processo de semi-compostagem. Para esta camada, pode-se observar que em cerca 5,5% da área de cama os valores de U<sub>C-20</sub> registrados foram inferiores ao nível mínimo recomendado para manutenção do processo de semi-compostagem da cama (40,0%) (Figura 5.8B). Apesar de pouco representativo, pode-se inferir que a atividade de decomposição era

mais lenta ou inexistente nesta porcentagem de área de cama, uma vez que níveis de  $U_{C-20}$  abaixo de 40,0% podem acarretar redução das populações de microrganismos decompositores (Stentiford, 1996; Damasceno, 2020).

De acordo com Damasceno (2020), quando o material de cama está excessivamente úmido ( $> 60,0\%$ ), como observado em cerca de 49,0% da área subsuperficial da cama (Figura 4.9B), os espaços disponíveis para circulação de oxigênio são preenchidos por água e, como consequência, há redução da concentração de oxigênio, acarretando condição de anaerobiose. Portanto, considerando os valores de  $t_{C-20}$  e  $U_{C-20}$  registrados na camada subsuperficial da cama (Figuras 5.6B e 5.8B), estima-se que o processo de decomposição do material estava ocorrendo de forma lenta nesta instalação. Além disso, com base nos baixos níveis de  $t_{C-20}$  e elevados níveis de  $U_{C-20}$  registrados na cama, pode-se inferir que o composto formado poderá não ter boas características agronômicas, em virtude da potencial lixiviação de nutrientes e não eliminação de patógenos (Valente et al., 2009; Fávero et al., 2015a).

Os altos valores de  $U_{C-20}$  retratados neste estudo (Figura 5.8B) diferem dos reportados por outros autores (Fávero et al., 2015a; Oliveira et al., 2019b; Guesine, 2020; Radavelli et al., 2020; Andrade et al., 2021; Oliveira et al., 2021). Estes autores avaliaram os níveis de umidade da cama na camada subsuperficial (0,15 – 0,20 m) de sistemas *CB* em diferentes locais do Brasil, e observaram a ocorrência de valores de  $U_{C-20}$  sempre inferiores a 70,0%.

Em relação ao manejo da cama, dois pontos devem ser considerados. O primeiro é relativo à reposição de cama com material seco, que foi realizada por duas vezes durante o período, mas a quantidade adicionada não foi suficiente para manter a umidade da cama em níveis adequados. O segundo se refere ao revolvimento da cama, que era realizado duas vezes ao dia (09h00min e 16h00min), com extenso intervalo entre o segundo revolvimento de um dia e o primeiro do dia seguinte (16 a 18 horas). Com base nos resultados de  $U_{C-sup}$  e  $U_{C-20}$  obtidos neste estudo (Figuras 5.7 e 5.8), que retrataram as condições de cama após extenso período sem revolvimento, é pertinente que seja considerada a realização de mais uma operação diária de revolvimento, preferencialmente no horário da primeira ordenha (04h00min). Ao mesmo tempo, é recomendável que seja realizada a realocação dos horários dos demais revolvimentos para o final da manhã (após 11h00min) e final da tarde (após 17h00min). Deste modo, espera-se que seja possível promover a homogeneização do material, incorporação de oxigênio e remoção dos níveis excedentes de umidade, haja vista que o adequado manejo da cama é fator primordial para o desempenho de sistemas *CB* (Black et al., 2014; Damasceno, 2020; Leso et al., 2020).

Na Figura 5.9 estão ilustrados os mapas de distribuição espacial de  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  e  $\text{pH}_{\text{C-20}}$ , durante o período de inverno.

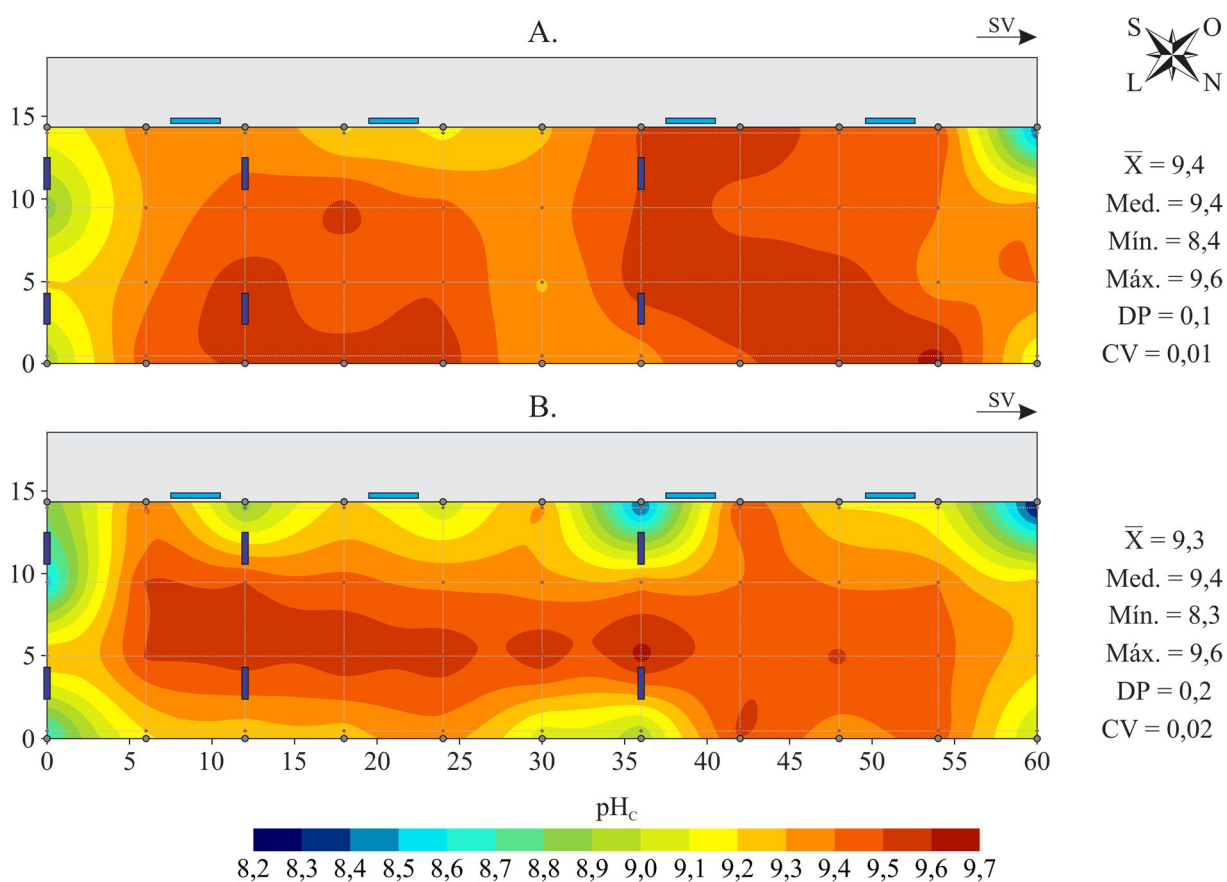


Figura 5.9. Distribuição espacial de potencial hidrogeniônico da cama na superfície –  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  (B). \*SV – sentido da ventilação;  $\bar{X}$  – média; Med. – mediana; Mín. – mínimo; Máx. – máximo; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação. Fonte: O autor (2022).

Por meio da Figura 5.9, pode-se observar que os valores de média e mediana de  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  e  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  foram próximos e, portanto, suas distribuições não tinham assimetria acentuada (Little & Hills, 1978). Em ambos os casos, o CV foi menor que 0,12 e caracterizou baixa variabilidade, conforme a classificação proposta por Warrick & Nielsen (1980).

Em ambas as camadas da cama avaliadas, o pH apresentou baixa variabilidade espacial durante o período de inverno (Figura 5.9), com amplitudes de variação iguais a 1,2 e 1,3, na superfície e a 0,2 m de profundidade, respectivamente. Os comportamentos das distribuições espaciais foram próximos na superfície e subsuperfície, indício de que os fenômenos que regem a distribuição desta variável na cama são semelhantes entre camadas, e de que o revolvimento da cama estava assegurando a relativa homogeneização do material ao longo do perfil. Considerando que o processo de decomposição da cama estava ocorrendo de maneira similar ao longo do perfil, estima-se que o composto gerado ao final do processo de semi-compostagem

poderá ter características agronômicas ligeiramente uniformes ao longo da profundidade da cama, conforme sugerido por Oliveira et al. (2021).

Conforme Pereira Neto (2007), o intervalo de pH considerado ideal para a maioria dos microrganismos decompositores situa-se entre 5,5 e 8,0. Outros autores afirmam que a faixa ótima é mais ampla, haja vista que a maioria das enzimas encontra-se ativa no intervalo de 5,5 a 8,5 e, portanto, esta seria a faixa desejada durante o processo de compostagem (Rodrigues et al., 2006). No presente estudo, foi observado que os valores de pH da cama estiveram acima do recomendado em toda a área de cama da instalação, em ambas as camadas avaliadas (superfície e 0,2 m de profundidade) (Figura 5.9). Valores de pH inferiores a 8,5 foram obtidos apenas em algumas regiões periféricas da área de cama da instalação (nas quatro faces). Por meio da observação conjunta dos mapas de distribuição espacial de temperatura (Figura 5.5), umidade (Figura 5.7) e pH da cama (Figura 5.9), verifica-se que as regiões em que foram obtidos valores médios de pH mais baixos ( $\leq 8,5$ ) são coincidentes com os locais em que foram observadas temperaturas mais baixas ( $< 30,0$  °C) e/ou níveis de umidade mais elevados ( $> 80,0\%$ ). Logo, é pertinente inferir que a obtenção de níveis mais baixos de pH nestes locais ocorreu devido a lenta ou inexistente atividade de decomposição, função das baixas temperaturas e altas umidades registradas no material de cama, que podem limitar ou inibir o desenvolvimento dos microrganismos atuantes no processo de compostagem (Stentiford, 1996; Black et al., 2013). Por outro lado, valores de pH inferiores a 8,5 foram pouco representativos no sistema avaliado neste estudo, haja vista que foram registrados em menos de 1,0% da área de cama (Figura 5.10).

Por meio dos mapas de distribuição espacial (Figura 5.9), pode-se observar que os níveis médios de  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  foram majoritariamente superiores a 8,5. Resultados tais como os observados são comuns em etapas avançadas do processo de compostagem, em que já ocorreu completo consumo dos ácidos orgânicos formados na etapa inicial, ou quando a relação carbono-nitrogênio (C:N) está baixa (Hanajima et al., 2010). Os elevados valores de pH obtidos também são uma evidência de que podem ter ocorrido perdas de nitrogênio (N) por volatilização, que são particularmente altas quando o pH é superior a 7,0, conforme afirmado por Bernal et al. (2009).

Os resultados de pH da cama retratados no presente estudo (Figuras 5.9 e 5.10) corroboram com os observados por outros autores, em diferentes épocas do ano. Fávero et al. (2015a) conduziram estudos em sistemas *CB* no Estado de São Paulo, e observaram a ocorrência de valores de  $pH_{C-20}$  superiores a 8,5 no período de inverno. Oliveira et al. (2019b) avaliaram sistemas *CB* no Sul do Estado de Minas Gerais, e retrataram a ocorrência de valores médios de  $pH_{C-20}$  de  $9,0 \pm 0,8$ . Radavelli et al. (2020) realizaram estudo em caracterização de

sistemas *CB* no Oeste do Estado de Santa Catarina, e retrataram a ocorrência de valores médios de  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  de  $8,7 \pm 0,5$ . Oliveira et al. (2021) avaliaram o pH da cama em sistema *CB* fechado, e obtiveram distribuições espaciais de pH com valores majoritariamente superiores a 9,0. Andrade et al. (2021) avaliaram a distribuição espacial do pH da cama em sistema *CB* fechado durante o período de inverno, e observaram a ocorrência de níveis de pH superiores a 8,7.

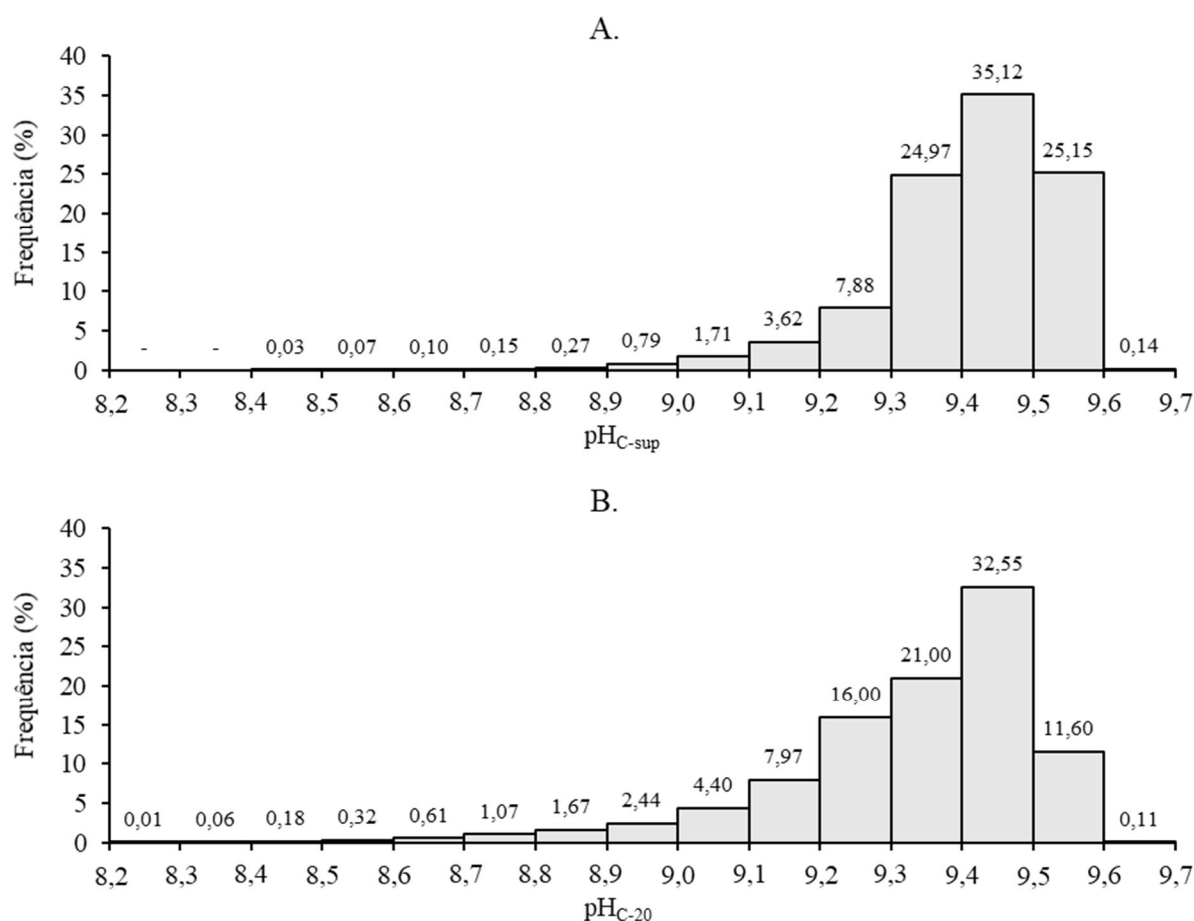


Figura 5.10. Distribuição de frequência de potencial hidrogeniônico da cama na superfície –  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  (A) e na profundidade de 0,2 m –  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  (B). Fonte: O autor (2022).

De acordo com Fávero et al. (2015b), níveis de pH superiores a 8,8 podem inibir o crescimento de patógenos de mastite ambiental. Portanto, com base nos resultados retratados pelas Figuras 5.9 e 5.10, pode-se inferir que os elevados níveis de pH observados no presente estudo podem ter sido benéficos para a sanidade dos animais alojados no sistema *CBAVP* avaliado, bem como para a qualidade do leite produzido neste local.

Em sistemas *CB*, o processo de semi-compostagem do material de cama geralmente ocorre no intervalo de um ano, podendo ser acelerado ou retardado conforme o material utilizado como substrato, lotação de animais, manejo empregado e frequência e volume de

reposição da cama com material seco. Os elevados valores de  $\text{pH}_{\text{C-sup}}$  e  $\text{pH}_{\text{C-20}}$  (Figura 5.9 e 5.10) observados neste estudo podem ser um indício de que a relação carbono-nitrogênio (C:N) do material de cama presente nesta instalação estava baixa, apesar deste material ter sido trocado há apenas quatro meses. Com a intensa atividade dos microrganismos decompositores, comum na etapa inicial do processo de compostagem, normalmente ocorre o consumo do carbono disponibilizado inicialmente, sendo necessário realizar novas adições via reposição com material seco. É por meio das reposições de cama que se assegura o fornecimento adequado de carbono e a manutenção dos valores de pH dentro da faixa recomendada para os microrganismos decompositores. Como a frequência e a quantidade de material de cama seco adicionada via reposição nesta instalação eram baixas, os níveis de pH estavam acima do recomendado e, provavelmente, o material de cama já estava com baixa disponibilidade de carbono. Estas condições acarretam baixa atividade de decomposição e baixa produção de calor, conforme já retratado por meio dos mapas de distribuição espacial de  $t_{\text{C-20}}$  (Figura 5.5B). Neste caso, recomenda-se que sejam realizadas mais operações de reposição da cama com material seco, bem como que o volume adicionado em casa reposição seja maior.

O mapa de distribuição espacial e o gráfico de distribuição de frequência de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{\text{ar,C}}$ ) estão ilustrados na Figura 5.11. Por meio da citada figura, observou-se que a distribuição espacial de  $v_{\text{ar,C}}$  foi muito heterogênea ao longo da área de cama da instalação, haja vista que foram registrados valores médios entre 0,2 e 4,0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  (variação igual a 3,8  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

Para sistemas *CB*, recomenda-se que a velocidade do ar seja mantida próxima de 1,8  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  em toda a zona ocupada pelos animais (ZOA), como forma de assegurar a secagem da cama, remover gases e favorecer trocas térmicas (Janni et al., 2007; Black et al., 2013). Considerando a magnitude de velocidade recomendada pelos citados autores como a velocidade mínima do ar de resfriamento e secagem da cama ( $\text{VMARS} = 1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), verificou-se que na área de cama do sistema avaliado houve ocorrência de regiões com valores de  $v_{\text{ar,C}}$  inferiores ao desejado (Figura 5.11A). Ao longo da área de cama da instalação, as maiores magnitudes de  $v_{\text{ar,C}}$  foram registradas nas zonas de atuação das duas primeiras linhas de ventiladores, indício de que são devidas as correntes de ar geradas pela ventilação mecânica. Todavia, notou-se também a ocorrência de zonas com baixa  $v_{\text{ar,C}}$  nas regiões abaixo das linhas de ventiladores um e três, e extremidade Noroeste da instalação.

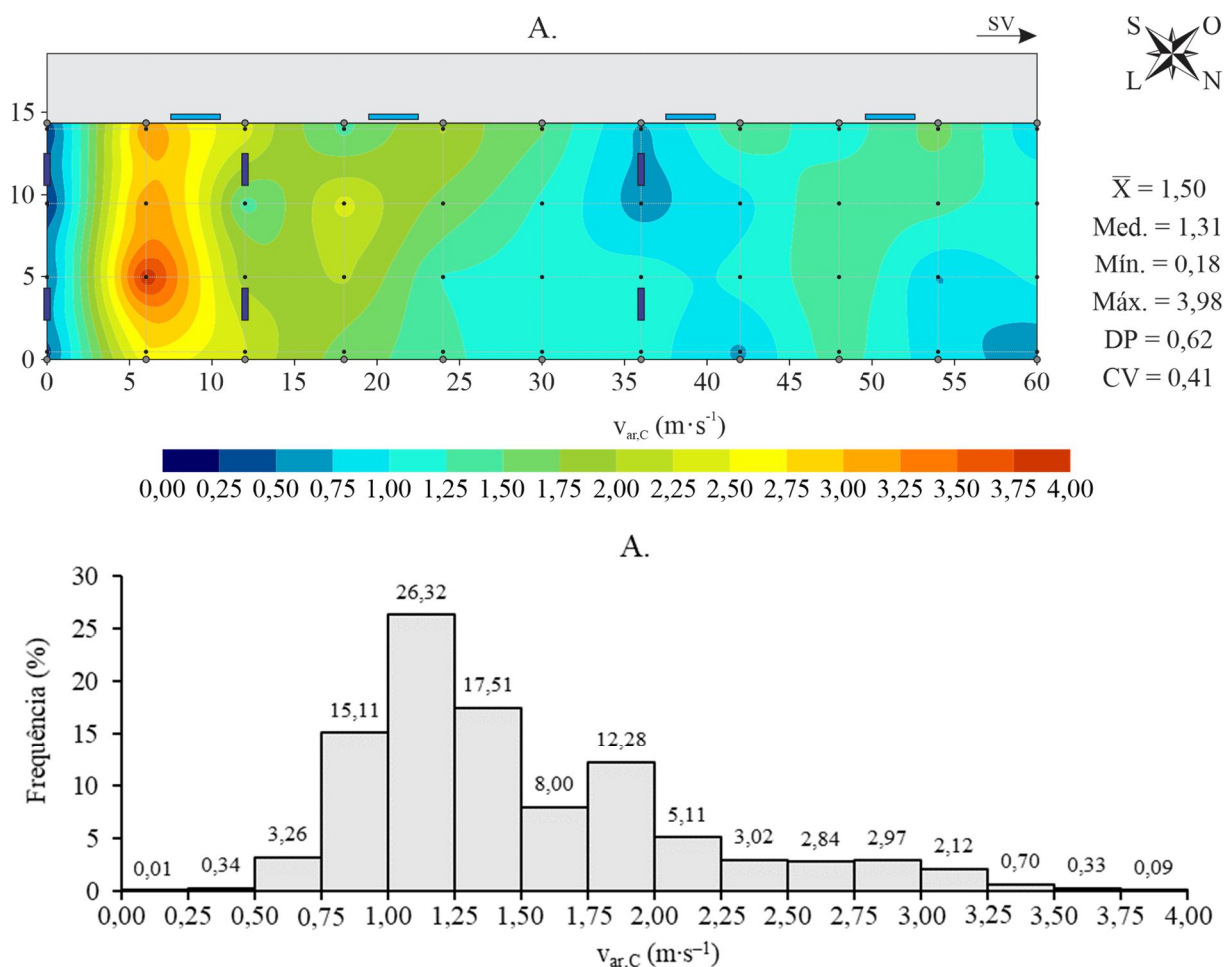


Figura 5.11. Distribuição espacial (A) e de frequência (B) de velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ). \*SV – sentido da ventilação;  $\bar{X}$  – média; Med. – mediana; Mín. – mínimo; Máx. – máximo; DP – desvio-padrão; CV – coeficiente de variação. Fonte: O autor (2022).

Fagundes et al. (2020) avaliaram o escoamento de ar gerado por ventiladores de baixo volume e alta rotação (*LVHS*) por meio de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD). Os autores observaram que na região imediatamente abaixo da primeira linha de ventiladores ocorre a formação de uma zona com baixa velocidade do ar. Por certo, como os ventiladores estavam instalados a 3,0 m de altura e com inclinação de 45° em relação a horizontal, o fluxo de ar na região imediatamente anterior era succionado e direcionado pelos equipamentos, formando uma zona com baixa  $v_{ar,C}$  abaixo da primeira linha de ventilação (Figura 5.11A). A distribuição espacial de  $v_{ar,C}$  ao longo da área de cama é um indício de que a quantidade e disposição dos ventiladores presentes na instalação avaliada não estava adequada, haja vista que ocorreu a formação de regiões com baixa  $v_{ar,C}$  também na região central e posterior (Noroeste) da instalação. Em relação a região central e posterior da instalação, pode-se inferir que os baixos valores de  $v_{ar,C}$  registrados são devidos a distância superior ao recomendado entre linhas de ventiladores (12,0 m – Damasceno, 2020). Na instalação avaliada, como as distâncias

entre segunda, terceira linha de ventilação e extremidade Noroeste eram de 24,0 m, observou-se que o sistema de ventilação presente não foi suficiente para assegurar condições homogêneas de  $v_{ar,C}$  ao longo de toda a área de cama da instalação, conforme ilustrado na Figura 5.11A.

No presente estudo, mesmo com uso de ventilação mecânica (*LVHS*) foi observado que a distribuição de  $v_{ar,C}$  na área de cama não foi uniforme (Figura 5.11A). Apenas nos primeiros 20,0 m da área de cama, de Sudeste a Noroeste da instalação, os valores médios de  $v_{ar,C}$  foram iguais ou superiores ao recomendado para secagem da cama, remoção de gases e favorecimento das trocas térmicas ( $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Em todo o restante da área, bem como na extremidade Sudeste (próximo a mureta), a magnitude de  $v_{ar,C}$  era inferior a VMARS.

Os resultados de  $v_{ar,C}$  retratados neste estudo (Figura 5.11) corroboram com os observados por Oliveira et al. (2019), que avaliaram a distribuição espacial das condições térmicas em sistemas *CB* abertos e com diferentes tipos de ventilação (natural, mecânico do tipo *HVLS* e mecânico do tipo *LVHS*) durante o período de Outono. No sistema *CB* com ventilação do tipo *LVHS*, os autores observaram que a distribuição de  $v_{ar,C}$  não era uniforme, e que houve predomínio de magnitudes de  $v_{ar,C}$  inferiores a  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em 58,4% da área de cama da instalação.

Por meio da Figura 5.11B, pode-se observar que a  $v_{ar,C}$  foi inferior ao recomendado em cerca de 70,0% da área de cama. Esta observação reforça a inferência de que a quantidade e distribuição de ventiladores *LVHS* ao longo do sistema avaliado não atenderam a necessidade de ventilação requerida no local. Com vistas à melhoria da uniformidade de velocidade do ar ao longo da área de cama e, por conseguinte, dos níveis de temperatura e umidade superficial da cama, é recomendável que o sistema de ventilação empregado no local seja redimensionado, alterando a quantidade e disposição de ventiladores ali presentes.

## 5.4 CONCLUSÕES

Por meio da aplicação de técnicas de geoestatística, foi possível verificar que as variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ), potencial hidrogeniônico da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ), e velocidade do ar ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ) possuíam dependência espacial. Para todas estas variáveis, foi verificada ocorrência de forte dependência espacial, viabilizando a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem e a geração de mapas de distribuição espacial.

A partir dos mapas gerados, foi possível observar que as variáveis  $t_{C-sup}$ ,  $t_{C-20}$ ,  $U_{C-sup}$ ,  $U_{C-20}$  e  $v_{ar,C}$  apresentaram elevada variabilidade espacial ao longo da área de cama da instalação,

ao passo os atributos  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  tiveram baixa variação (8,20–9,70). Na camada superficial, a temperatura da cama foi inferior a 20,0 °C (14,1 a 19,6 °C), indicando ser confortável para que os animais permanecessem deitados. Porém, os valores médios de  $U_{C-sup}$  registrados na região próxima ao corredor de alimentação foram superiores a 60,0%, condição que pode gerar problemas de sanidade e qualidade do leite. A 0,2 m de profundidade, foram observados níveis de  $t_{C-20}$  predominantemente abaixo de 40,0 °C (87,0% da área) e de  $U_{C-20}$  acima de 60,0% (49,0% da área) em alguns locais (regiões periféricas e próximo ao corredor de alimentação da instalação), indícios de que o processo de decomposição do material de cama estava ocorrendo de forma lenta, conforme retratado pelos elevados valores de  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  ( $> 9,0$ ). Em relação a  $v_{ar,C}$ , verificou-se a ocorrência de distribuição não uniforme e magnitudes de velocidade inferiores a  $1,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  em cerca de 70,0% da área de cama da instalação. Níveis adequados de  $v_{ar,C}$  foram observados apenas nos primeiros 20,0 m da instalação, de Sudeste a Noroeste, como resultado das linhas de ventiladores presentes nesta região.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G.L.P.; PANDORFI, H.; GUISELINI, C.; HENRIQUE, H.M.; ALMEIDA, G.A.P. Uso do sistema de resfriamento adiabático evaporativo no conforto térmico de vacas da raça girolando. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.754–760, 2011. DOI: 10.1590/S1415-43662011000700015.
- ANDRADE, R.R. **Ambiência e bem-estar animal na produção intensiva de leite em sistemas compost barn fechados para a tipologia construtiva e clima do Brasil**. 2021. 158p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Viçosa.
- ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; FREITAS, L.C.S.R.; FERREIRA, C.F.S.; BARBARI, M.; BAPTISTA, F.J.F.; COELHO, D.J.R. Spatial distribution of bed variables, animal welfare indicators, and milk production in a closed compost-bedded pack barn with a negative tunnel ventilation system. **Journal of Thermal Biology**, v.23, p.103111, 2021. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2021.103111.
- ANDRIOTTI, J.L.S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. 1.ed. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2003. 165p.
- BERNAL, M.P.; ALBURQUERQUE, J.A.; MORAL, R. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. **Bioresource Technology**, v.100, p.5444–5453, 2009. DOI: 10.1016/J.BIORTECH.2008.11.027.
- BEWLEY, J.M.; ROBERTSON, L.M.; ECKELKAMP, E.A. A 100-year review: Lactating dairy cattle housing management. **Journal of Dairy Science**, v.100, p.10418–10431, 2017. DOI: 10.3168/JDS.2017-13251.

BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; BEWLEY, J.M. Compost bedded pack dairy barn management, performance, and producer satisfaction. **Journal of Dairy Science**, v.96, p.8060–8074, 2013. DOI: 10.3168/jds.2013-6778.

BLACK, R.A.; TARABA, J.L.; DAY, G.B.; DAMASCENO, F.A.; NEWMAN, M.C.; AKERS, K.A.; WOOD, C.L.; MCQUERRY, K.J.; BEWLEY, J.M. The relationship between compost bedded pack performance, management, and bacterial counts. **Journal of Dairy Science**, v.97, p.2669–2679, 2014. DOI: 10.3168/jds.2013-6779.

CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.777–783, 1992. DOI: 10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501–1511, 1994. DOI: 10.2136/SSSAJ1994.03615995005800050033X.

CURI, T.M.R.C.; CONTI, D.; VERCELLINO, R.A.; MASSARI, J.M.; MOURA, D.J.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R. Positioning of sensors for control of ventilation systems in broiler houses: a case study. **Scientia Agricola**, v.74, p.101–109, 2017. DOI: 10.1590/1678-992X-2015-0369.

DAMASCENO, F.A. **Compost Barn como uma alternativa para a pecuária leiteira**. 1.ed. Divinópolis: Adelante, 2020. 396p.

DAMASCENO, F.A.; OLIVEIRA, C.E.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; BARBARI, M.; FERRAZ, P.F.P. Spatial distribution of thermal variables, acoustics and lighting in compost dairy barn with climate control system. **Agronomy Research**, v.17, p.385–395, 2019. DOI: 10.15159/AR.19.115.

ECKELKAMP, E.A.; TARABA, J.L.; AKERS, K.A.; HARMON, R.J.; BEWLEY, J.M. Understanding compost bedded pack barns: Interactions among environmental factors, bedding characteristics, and udder health. **Livestock Science**, v.190, p.35–42, 2016. DOI: 10.1016/j.livsci.2016.05.017.

FAGUNDES, B.; DAMASCENO, F.A.; ANDRADE, R.R.; SARAZ, J.A.O.; BARBARI, M.; VEGA, F.A.O.; NASCIMENTO, J.A.C. Comparison of airflow homogeneity in compost dairy barns with different ventilation systems using the CFD model. **Agronomy Research**, v.18, p.788–796, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.106.

FÁVERO, S.; PORTILHO, F.V.R.; OLIVEIRA, A.C.R.; LANGONI, H.; PANTOJA, J.C.F. Longitudinal trends and associations between compost bedding characteristics and bedding bacterial concentrations. **Journal of Agricultural Science**, v.7, p.58–70, 2015a. DOI: 10.5539/JAS.V7N10P58.

FÁVERO, S.; PORTILHO, F.V.R.; OLIVEIRA, A.C.R.; LANGONI, H.; PANTOJA, J.C.F. Factors associated with mastitis epidemiologic indexes, animal hygiene, and bulk milk bacterial concentrations in dairy herds housed on compost bedding. **Livestock Science**, v.181, p.220–230, 2015b. DOI: 10.1016/j.livsci.2015.09.002.

FERRAZ, G.A.S.; SILVA, F.M.; OLIVEIRA, M.S.; CUSTÓDIO, A.A.P.; FERRAZ, P.F.P. Variabilidade espacial dos atributos da planta de uma lavoura cafeeira. **Revista Ciência Agrônômica**, v.48, p.91, 2017. DOI: 10.5935/1806-6690.20170009.

FERRAZ, P.F.P.; FERRAZ, G.A.S.; DAMASCENO, F.A.; MOURA, R.S.; SILVA, M.A.J.G.; RODRIGUES, R.L. Spatial variability of enthalpy in rabbit house with and without ridge vent. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.126–132, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V23N2P126-132.

FERRAZ, P.F.P.; GONZALEZ, V.C.; FERRAZ, G.A.S.; DAMASCENO, F.A.; OSORIO, J.A.S.; CONTI, L. Assessment of spatial variability of environmental variables of a typical house of laying hens in colombia: Antioquia state case. **Agronomy Research**, v.18, p.1244–1254, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.099.

FREITAS, L.C.S.R.; TINÔCO, I.F.F.; GATES, R.S.; BARBARI, M.; CÂNDIDO, M.G.L.; TOLEDO, J. V. Development and validation of a data logger for thermal characterization in laying hen facilities. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, p.787–793, 2019. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p787-793.

GALAMA, P.J.; OUWELTJES, W.; ENDRES, M.I.; SPRECHER, J.R.; LESO, L.; KUIPERS, A.; KLOPČIČ, M. Symposium review: Future of housing for dairy cattle. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.5759–5772, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-17214.

GUESINE, G.D. **Sistema compost barn para bovinos leiteiros e seus reflexos nos parâmetros ambientais, desempenho e produção durante o verão em diferentes fases da lactação**. 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Piracicaba.

HANAJIMA, D.; KURODA, K.; MORISHITA, K.; FUJITA, J.; MAEDA, K.; MORIOKA, R. Key odor components responsible for the impact on olfactory sense during swine feces composting. **Bioresource Technology**, v.101, p.2306–2310, 2010. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.026.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANNI, K.A.; ENDRES, M.I.; RENEAU, J.K.; SCHOPER, W.W. Compost dairy barn layout and management recommendations. **Applied Engineering in Agriculture**, v.23, p.97–102, 2007. DOI: 10.13031/2013.22333.

KADER, N. EL; ROBIN, P.; PAILLAT, J.; LETERME, P. Turning, compacting and the addition of water as factors affecting gaseous emissions in farm manure composting. **Bioresource Technology**, v.98, p.2619–2628, 2007. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.035.

LESO, L.; BARBARI, M.; LOPES, M.A.; DAMASCENO, F.A.; GALAMA, P.; TARABA, J.L.; KUIPERS, A. Invited review: Compost-bedded pack barns for dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v.103, p.1072–1099, 2020. DOI: 10.3168/jds.2019-16864.

LITTLE, T.M.; HILLS, F.J. **Agricultural experimentation: design and analysis**. 1.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 1978. 368p.

LLONCH, L.; CASTILLEJOS, L.; MAINAU, E.; MANTECA, X.; FERRET, A. Effect of forest biomass as bedding material on compost-bedded pack performance, microbial content,

and behavior of nonlactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, 2020. DOI: 10.3168/jds.2020-18496.

LOBECK, K.M.; ENDRES, M.I.; SHANE, E.M.; GODDEN, S.M.; FETROW, J. Animal welfare in cross-ventilated, compost-bedded pack, and naturally ventilated dairy barns in the upper Midwest. **Journal of Dairy Science**, v.94, p.5469–5479, 2011. DOI: 10.3168/jds.2011-4363.

MARCHANT, B.P.; LARK, R.M. Robust estimation of the variogram by residual maximum likelihood. **Geoderma**, v.140, p.62–72, 2007. DOI: 10.1016/J.GEODERMA.2007.03.005.

MATHERON, G. **Traité de géostatistique appliquée**. 14.ed. Paris: Editions Technip, 1962. v.1 333p.

MCBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, p.617–639, 1986. DOI: 10.1111/J.1365-2389.1986.TB00392.X.

MEDEIROS, B.B.L.; MOURA, D.J. DE; MASSARI, J.M.; CURI, T.M.R. DE C.; MAIA, A.P.D.A. Uso da geoestatística na avaliação de variáveis ambientais em galpão de suínos criados em sistema “wean to finish” na fase de terminação. **Engenharia Agrícola**, v.34, p.800–811, 2014. DOI: 10.1590/S0100-69162014000500001.

MEE, J.; BOYLE, L. Assessing whether dairy cow welfare is “better” in pasture-based than in confinement-based management systems. **New Zealand Veterinary Journal**, v.68, p.168–177, 2020. DOI: 10.1080/00480169.2020.1721034.

MOTA, V.C.; ANDRADE, E.T.; LEITE, D.F. Bed temperature in compost barns turned with rotary hoe and offset disc harrow. **Engenharia Agrícola**, v.39, p.280–287, 2019. DOI: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n3p280-287/2019.

NÄÄS, I.A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 1989. 183p.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, G.A.S.; NASCIMENTO, J.A.C.; VEGA, F.A.O.; TITÔCO, I.F.F.; ANDRADE, R.R. Assessment of spatial variability of bedding variables in compost bedded pack barns with climate control system. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.93, p.20200384, 2021. DOI: 10.1590/0001-3765202120200384.

OLIVEIRA, C.E.A.; DAMASCENO, F.A.; FERRAZ, P.F.P.; NASCIMENTO, J.A.C.; FERRAZ, G.A.S.; BARBARI, M. Geostatistics applied to evaluation of thermal conditions and noise in compost dairy barns with different ventilation systems. **Agronomy Research**, v.17, p.783–796, 2019a. DOI: 10.15159/AR.19.116.

OLIVEIRA, V.C.; DAMASCENO, F.A.; OLIVEIRA, C.E.A.; FERRAZ, P.F.P.; FERRAZ, G.A.S.; SARAZ, J.A.O. Compost-bedded pack barns in the state of Minas Gerais: Architectural and technological characterization. **Agronomy Research**, v.17, p.2016–2028, 2019b. DOI: 10.15159/AR.19.179.

PASSETTI, R.A.C.; EIRAS, C.E.; GOMES, L.C.; SANTOS, J.F.; PRADO, I.N. Intensive dairy farming systems from Holland and Brazil: SWOT analyse comparison. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v.38, p.439–446, 2016. DOI: 10.4025/actascianimsci.v38i4.31467.

PEDROSA, T.D.; FARIAS, C.A.S.; PEREIRA, R.A.; FARIAS, E.T.R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v.1, p.44–48, 2013. DOI: 10.14583/2318-7670.v01n01a08.

PEIXOTO, M.S.M.; BARBOSA FILHO, J.A.D.; MACHADO, N.A.F.; VIANA, V.S.S.; COSTA, J.F.M. Thermoregulatory behavior of dairy cows submitted to bedding temperature variations in Compost barn systems. **Biological Rhythm Research**, v.52, p.1120–1129, 2021. DOI: 10.1080/09291016.2019.1616904/FORMAT/EPUB.

PEREIRA NETO, J.T. **Manual de compostagem: processo de baixo custo**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2007. 81p.

PERISSINOTTO, M.; MOURA, D.J. Determinação do conforto térmico de vacas leiteiras utilizando a mineração de dados. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v.1, p.117–126, 2007. DOI: 10.18011/bioeng2007v1n2p117-126.

PILATTI, J.A.; VIEIRA, F.M.C. Environment, behavior and welfare aspects of dairy cows reared in compost bedded pack barns system. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.5, p.97–105, 2017.

PINHEIRO, A.C.; SARAIVA, E.P.; SARAIVA, C.A.S.; FONSECA, V.F.C.; ALMEIDA, M.E.V.; SANTOS, S.G.G.C.; AMORIM, M.L.C.M.; RODRIGUES NETO, P.J. Características anatomofisiológicas de adaptação de bovinos leiteiros ao ambiente tropical. **Agropecuária Técnica**, v.36, p.280–293, 2015. DOI: 10.25066/AGROTEC.V36I1.22280.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2016.

RADAVELLI, W.M.; DANIELI, B.; ZOTTI, M.L.A.N.; GOMES, F.J.; ENDRES, M.I.; SCHOGOR, A.L.B. Compost barns in Brazilian Subtropical region (Part 1): facility, barn management and herd characteristics. **Research, Society and Development**, v.9, p.e445985198, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5198.

RIBEIRO JÚNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. GeoR: a package for geostatistical analysis. **R News**, v.1, p.14–18, 2001.

RODRIGUES, M.S.; SILVA, F.C.; BARREIRA, L.P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C.A.; RIBEIRO, W.C. (Ed.). **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. 1.ed. Botucatu: FEPAF, 2006. p.63–94.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L.G.; SILVA, F.F.; ALVES, M.C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v.108, p.1–7, 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0507-8.

SILVA, M.V.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G.L.P.; JARDIM, A.M.R.F.; BATISTA, P.H.D.; SILVA, R.A.B.; LOPES, I.; OLIVEIRA, M.E.G.; SILVA, J.L.B.; MORAES, A.S. Spatial variability and exploratory inference of abiotic factors in barn compost confinement for cattle

in the semiarid. **Journal of Thermal Biology**, v.94, p.102782, 2020. DOI: 10.1016/j.jtherbio.2020.102782.

STENTIFORD, E.I. Composting control: principles and practice. In: BERTOLDI, M. DE; SEQUI, P.; LEMMES, B.; PAPI, T. (Ed.). **The Science of Composting**. 1.ed. Dordrecht: Springer, 1996. p.49–59. DOI: 10.1007/978-94-009-1569-5\_6.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília: Embrapa, 2017. 574p.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v.38, p.45–94, 1986. DOI: 10.1016/S0065-2113(08)60673-2.

VALENTE, B.S.; XAVIER, E.G.; MORSELLI, T.B.. G.A.; JAHNKE, D.S.; BRUM JR., B.; CABRERA, B.R.; MORAES, P.; LOPES, D.C.N. Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos. **Archivos de Zootecnia**, v.58, p.59–85, 2009. DOI: 10.21071/az.v58i224.5074.

VALENTE, D.A.; SOUZA, C.F.; ANDRADE, R.R.; TINÔCO, I.F.F.; SOUSA, F.C.; ROSSI, G. Comparative analysis of performance by cows confined in different typologies of compost barns. **Agronomy Research**, v.18, p.1547–1555, 2020. DOI: 10.15159/AR.20.103.

VIEIRA, F.M.C.; SOARES, A.A.; HERBUT, P.; VISMARA, E.S.; GODYŃ, D.; SANTOS, A.C.Z. DOS; LAMBERTES, T.S.; CAETANO, W.F. Spatio-thermal variability and behaviour as bio-thermal indicators of heat stress in dairy cows in a Compost Barn: A case study. **Animals**, v.11, p.1197, 2021. DOI: 10.3390/ani11051197.

VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P.; CEDDIA, M.B.; GONZÁLEZ, A.P. Detrending non stationary data for geostatistical applications. **Bragantia**, v.69, p.01–08, 2010a. DOI: 10.1590/S0006-87052010000500002.

VIEIRA, S.R.; CARVALHO, J.R.P.; GONZÁLEZ, A.P. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, v.69, p.97–105, 2010b. DOI: 10.1590/S0006-87052010000500011.

WARRICK, W.A.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Application of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p.319–344. .

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. 1.ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215p.

ZHAO, S.; LIU, X.; DUO, L. Physical and chemical characterization of municipal solid waste compost in different particle size fractions. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.21, p.509–515, 2012.

## 6 CONCLUSÕES GERAIS

A partir dos resultados alcançados, foi possível verificar que:

Durante todo o período experimental de inverno, os valores de temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) média mantiveram-se dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação ( $4,0 \leq t_{bs} < 24,0$  °C), apesar da  $t_{bs}$  máxima absoluta atingir valores fora da zona de conforto térmico em alguns horários, na maioria dos dias.

Os valores de umidade relativa do ar (UR) média estiveram acima da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação ( $30,0 \leq UR < 80,0\%$ ) nos horários das 00h00min às 10h00min, e das 17h00min às 24h00min, na maioria dos dias.

Os valores médios de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e Entalpia Específica do Ar (H) calculados demonstraram a prevalência de condições adequadas de conforto térmico ao longo de todo o dia.

Por meio de técnicas de geoestatística, verificou-se ocorrência de dependência espacial forte para todas as variáveis e índices avaliados, viabilizando a aplicação de técnicas de interpolação por krigagem e geração de mapas de distribuição espacial.

Em relação ao ambiente térmico, foi possível observar que as variáveis ( $t_{bs}$  e UR) e índices (ITU e H) analisados apresentavam variabilidade espacial. As variáveis  $t_{bs}$  e UR tiveram distribuição variável ao longo da instalação, notadamente nos períodos manhã e tarde, mas a combinação destas duas variáveis retornou mapas de ITU e H com distribuição dentro da faixa de conforto térmico para bovinos leiteiros em lactação, em todos os períodos (madrugada, manhã, tarde e noite).

Os valores mais elevados de  $t_{bs}$ , ITU e H foram registrados no período tarde, em região próxima face Noroeste da instalação ( $t_{bs} = 23,2$  °C, ITU = 69,7 e H = 50,9 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>), que recebia incidência de radiação solar direta. Os valores mais baixos de  $t_{bs}$ , ITU e H foram registrados no período madrugada, na região próxima dos ventiladores ( $t_{bs} = 10,0$  °C, ITU = 50,0 e H = 29,8 kJ·kg de ar seco<sup>-1</sup>).

Para velocidade do ar na altura de 1,5 m ( $v_{ar,M}$ ) e ao nível da cama ( $v_{ar,C}$ ), foi verificada ocorrência de distribuições não uniformes ao longo de toda a área interna, estando abaixo do recomendado pela literatura ( $1,8$  m·s<sup>-1</sup>) em mais de 65,0% da área interna da instalação. A heterogeneidade das distribuições de  $v_{ar,M}$  e  $v_{ar,C}$  é um indício de que o sistema de ventilação mecânico utilizado não estava adequado às necessidades de ventilação requeridas. Magnitudes adequadas de ventilação foram observadas apenas nos primeiros 20,0 m da instalação, de Sudeste a Noroeste, como resultado das linhas de ventiladores presentes nesta região.

Com relação a qualidade da cama, foi possível observar que as variáveis temperatura da cama na superfície ( $t_{C-sup}$ ), temperatura da cama na profundidade de 0,2 m ( $t_{C-20}$ ), umidade da cama na superfície ( $U_{C-sup}$ ) e umidade da cama na profundidade de 0,2 m ( $U_{C-20}$ ) apresentaram elevada variabilidade espacial ao longo da área de cama, ao passo os atributos potencial hidrogeniônico da cama na superfície ( $pH_{C-sup}$ ) e potencial hidrogeniônico da cama na profundidade de 0,2 m ( $pH_{C-20}$ ) tiveram baixa variação (8,2–9,7).

Na camada superficial, a temperatura da cama foi inferior a 20,0 °C (14,1 a 19,6 °C), indicando ser confortável para que os animais permanecessem deitados. Porém, os valores médios de  $U_{C-sup}$  registrados na região próxima ao corredor de alimentação foram superiores a 60,0%, condição esta que pode gerar problemas de sanidade e qualidade do leite.

A 0,2 m, foram observados níveis de  $t_{C-20}$  predominantemente abaixo de 4,0 °C (87,0% da área) e de  $U_{C-20}$  acima de 60,0% (49,0% da área) em alguns locais (regiões periféricas e próximo ao corredor de alimentação), indícios de que o processo de decomposição do material de cama estava ocorrendo de forma lenta, conforme retratado pelos elevados valores de  $pH_{C-sup}$  e  $pH_{C-20}$  ( $> 9,0$ ).

Com o objetivo de aprimorar o conhecimento sobre sistemas *CB* abertos construídos no Brasil, faz-se necessário que sejam realizados estudos detalhados sobre as condições térmico-ambientais, eficiência energética e de ventilação, materiais de cama alternativos e manejos utilizando diferentes implementos, e suas influências sobre conforto térmico e qualidade da cama. É importante que estes estudos sejam conduzidos em diferentes períodos (inverno e verão), para que possibilitem melhor entendimento sobre o manejo do ambiente térmico e a qualidade da cama, em diferentes situações, sob condições climáticas do Brasil.

## ANEXO A

## Certificado de aprovação pela Comissão de Ética no Uso de Animais

**CERTIFICADO**

A Comissão de Ética no Uso de Animais - CEUA/UFV certifica que o processo nº 04/2021, intitulado “**Avaliação e caracterização de sistema de confinamento de bovinos leiteiros em instalação *compost barn* aberta e semiclimatizada via ventilação por pressão positiva**”, coordenado pela professora Ilda de Fátima Ferreira Tinôco do Departamento de Engenharia Agrícola, está de acordo com a Legislação vigente (Lei Nº 11.794, de 08 de outubro de 2008), as Resoluções Normativas editadas pelo CONCEA/MCTIC, a DBCA (Diretriz Brasileira de Prática para o Cuidado e a Utilização de Animais para Fins Científicos e Didáticos) e as Diretrizes da Prática de Eutanásia preconizadas pelo CONCEA/MCTIC, portanto sendo aprovado por esta Comissão em 07/04/2021, com validade de 12 meses.

**CERTIFICATE**

The Ethic Committee in Animal Use/UFV certify that the process number 04/2021, named “**Evaluation and characterization of a dairy cattle feedlot system in an open and semi-climatic compost barn facility via positive pressure ventilation**”, is in agreement with the actual Brazilian legislation ( Lei Nº 11.794, 2008, Normative Resolutions edited by CONCEA/MCTIC, the DBCA (Brazilian Practice Guideline for the Care and Use of Animals for Scientific and the Guidelines of Practice the Euthanasia recommended by CONCEA/MCTIC therefore being approved by the Committee on April 07, 2021 valid for 12 months.



Prof. Mariella Bontempo Duca de Freitas

Coordenadora

Comissão de Ética no Uso de Animais – CEUA/UFV