

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR NO EQUILÍBRIO  
TÉRMICO E RESPOSTAS AUTONÔMICAS DE BOVINOS  
CRUZADOS NELORE × ANGUS**

**Gustavo André Bernado Moura**  
Zootecnista

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP  
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**IMPACTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR NO EQUILÍBRIO  
TÉRMICO E RESPOSTAS AUTONÔMICAS DE BOVINOS  
CRUZADOS NELORE × ANGUS**

**Discente: Gustavo André Bernado Moura**

**Orientador (a): Dr(a). Alex Sandro Campos Maia**

**Coorientador (a): Dr(a). Vinícius de França Carvalho Fonsêca**

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de  
Jaboticabal, como parte das exigências  
para a obtenção do título de Doutor em  
Zootecnia.**

**2024**

## FICHA CATALOGRÁFICA

M929i	<p>Moura, Gustavo André Bernado</p> <p>Impacto da irradiância solar no equilíbrio térmico e respostas autonômicas de bovinos cruzados Nelore × Angus / Gustavo André Bernado Moura. -- Jaboticabal, 2024</p> <p>70 p. : il., tabs.</p> <p>Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: Alex Sandro Campos Maia</p> <p>Coorientador: Vinícius de França Carvalho Fonsêca</p> <p>1. Produção animal. 2. Biometeorologia animal. 3. Bovinocultura de corte. 4. Fisiologia e Bem-estar animal. I. Título.</p>
-------	---

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: IMPACTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR NO EQUILÍBRIO TÉRMICO E RESPOSTAS AUTONÔMICAS DE BOVINOS CRUZADOS NELORE x ANGUS

**AUTOR: GUSTAVO ANDRÉ BERNADO MOURA**

**ORIENTADOR: ALEX SANDRO CAMPOS MAIA**

**COORIENTADOR: VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSÊCA**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Zootecnia, pela Comissão Examinadora:

Pós-Doutorando VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSÊCA (Participação Virtual)  
Departamento de Zootecnia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** VINICIUS DE FRANCA CARVALHO FONSECA  
Data: 01/10/2024 14:07:48-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. MÁRCIA HELENA MACHADO DA ROCHA FERNANDES (Participação Virtual)  
Departamento de Zootecnia / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCIA HELENA MACHADO DA ROCHA FERNANDES  
Data: 02/10/2024 11:19:43-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dra. CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO (Participação Virtual)  
Irta - Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentaries / Barcelona/Espanha

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO  
Data: 01/10/2024 15:10:18-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. SHEILA TAVARES NASCIMENTO (Participação Virtual)  
Departamento de Zootecnia / Universidade Estadual de Maringá (UEM) - Maringá/PR

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** SHEILA TAVARES NASCIMENTO  
Data: 03/10/2024 08:26:33-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Pesquisador Dr. RODRIGO DIAS LAURITANO PACHECO (Participação Virtual)  
Empresa Matogrossense de Pesquisa Assistência e Extensão Rural / Cuiabá/MT

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RODRIGO DIAS LAURITANO PACHECO  
Data: 09/04/2024 12:52:26-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 19 de março de 2024

## DADOS CURRICULARES DO AUTOR

**Gustavo André Bernado Moura**, nascido em Serra Talhada – PE, em 05/11/1993. Graduou-se em Zootecnia pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST), obtendo o título em 2016. Ingressou no Mestrado em 2017, no Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus de Jaboticabal (FCAV), na área de Biometeorologia Animal, sob a orientação do Prof. Alex Sandro Campos Maia, onde defendeu sua dissertação em março de 2019. Iniciou seu Doutorado na mesma instituição em 2019, sob a orientação do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia e coorientação do Dr. Vinícius De França Carvalho Fonsêca. Em 2023, realizou Doutorado-Sanduiche na University of California-Davis, no Desert Research Extension Center. Em março de 2024, submeteu-se ao exame de defesa de tese, tendo sido aprovado pela banca examinadora, obtendo o título de Doutor. Seus interesses de pesquisa ao longo desse período abrangeram temas relacionados ao balanço de calor, termorregulação e fisiologia da termorregulação dos animais de produção, bioenergética, efeito das variáveis meteorológicas na performance dos animais de produção, zootecnia de precisão e análises de dados.

## EPÍGRAFE

*"A persistência é o caminho do êxito."*

Charles Chaplin

## **DEDICATÓRIA**

Dedico à memória de minha mãe, Andrea Lopes de Moura, e de meus tios, Aristóteles Simões de Moura e Adelma Lopes de Moura, assim como a toda a minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por tudo o que provê em minha vida.

Agradeço a toda a minha família pelo apoio e pelos ensinamentos que construíram meu caráter e fazem parte de quem sou hoje.

Agradeço ao meu orientador Prof. Alex Maia, pelos ensinamentos compartilhados e direcionamentos. A todos que fazem parte do grupo de Inovação Sustentabilidade em Biometeorologia Animal. Em especial a Ângela Arduino, por sempre nos ajudar e orientar. Ao coorientador e amigo Vinícius Fonsêca, pelos ensinamentos e paciência. Aos amigos e colegas do grupo: Cíntia Carol, Carol Nagib, Patric Castro, Ana Flávia, Eric Culhari, Bruno Simão, Caio Carmo, Nathalia Gervásio, Sérgio Fidelis, Valéria Oliveira, Erika Brelaz, Ingrid Silva, Juliete Almeida, Gabriela Casale, João Lucas e Paloma Ribeiro. Aos funcionários Lambari, Turquinho, Carlos e Sr. Tião.

Aos demais funcionários dos outros setores e departamentos da universidade, pelo apoio e serviços, incluindo Uanderson e equipe da FEPE, Osvaldo da Caprinocultura, Joãozinho da Ovinocultura, Marron e equipe da Bovinocultura Leiteira, Servidônio da Bovinocultura de Corte, Zé da Suinocultura, dentre outros não citados.

Ao Prof. Pedro Carvalho, pela oportunidade e ensinamentos compartilhados durante o período de Doutorado-Sanduíche. Ao Dr. Zinn, pela oportunidade e conhecimento compartilhado. A Brooke Latack, pela oportunidade, paciência e conhecimento compartilhado. Ao David Zinn, pela paciência. E a toda a equipe do Desert Research and Extension Center em Holtville, CA. Aos amigos e colegas: Irene, Edlane, Luan, Willian e Cesar.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Jaboticabal, e ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo financiamento da bolsa de doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisas do grupo de Inovação Sustentabilidade em Biometeorologia Animal, por meio do processo N° 2018/19148-1.

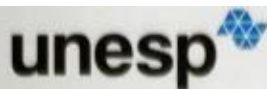
À equipe da Fundação de Apoio à Pesquisa, Ensino e Extensão (FUNEP).

À University of California-Davis.

## SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1	Caracterização do sistema de produção de bovinos de corte .....	3
2.2	Desafios meteorológicos enfrentados por bovinos em confinamentos.....	5
2.3	Fatores de risco ao estresse térmico .....	7
2.3.1	Propriedades físicas e ópticas da superfície cutânea dos animais .....	8
2.3.2	Alterações ambientais como estratégia de mitigação do estresse térmico.....	9
2.3.3	Produção de calor metabólico e manejo .....	9
2.4	O balanço de calor e seus componentes.....	12
2.4.1	Produção de calor metabólico .....	14
2.4.2	Condução .....	16
2.4.3	Convecção .....	17
2.4.4	Radiação .....	17
2.4.5	Transferência de calor associado à difusão do vapor de água.....	20
2.5	Balanço de calor por radiação em bovinos .....	22
2.6	Considerações finais .....	24
2.7	Objetivos .....	24
3	REFERÊNCIAS .....	25
4	CAPÍTULO 2 – IMPACT OF SOLAR IRRADIANCE ON HEAT BALANCE AND AUTONOMIC RESPONSES OF BLACK-HAIRED CROSSBREED NELLORE × ANGUS CATTLE .....	30
4.1	Introduction .....	32
4.2	Material and methods .....	33
4.2.1	Animals and experimental design .....	33
4.2.2	Meteorological variables .....	34
4.2.3	Autonomic responses and thermal equilibrium .....	35
4.2.4	Statistical analysis .....	37
4.2.4.1	Modeling with generalized additive models .....	37
4.3	Results .....	38
4.3.1	Results Modeling with GAM.....	39
4.4	Discussion.....	40
4.5	Conclusion .....	45
4.6	References.....	45
4.7	Figures .....	50

## CERTIFICADO CEUA



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Câmpus de Jaboticabal



### CEUA – COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

#### DECLARAÇÃO

Declaramos que o projeto de pesquisa intitulado "**Estudo do equilíbrio térmico de bovinos de corte F1 (Nelore X Angus): Desenvolvimento de um índice de conforto térmico e sua aplicação**", sob orientação do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia e Certificado CEUA protocolo nº 009283/19, aprovado em reunião ordinária em 15 de agosto de 2019, teve a inclusão de metodologia para obtenção da temperatura subcutânea, aprovada em reunião ordinária de 18 de dezembro de 2019.

Jaboticabal, 18 de dezembro de 2019.

  
**Profª Drª Fabiana Pilarski**  
Coordenadora – CEUA

## IMPACTO DA IRRADIÂNCIA SOLAR NO EQUILÍBRIO TÉRMICO E RESPOSTAS AUTÔNOMICAS DE BOVINOS CRUZADOS NELORE × ANGUS

**RESUMO** – O cruzamento entre *Bos indicus* Nelore e *Bos taurus* Angus tem sido utilizado por produtores de carne bovina no Brasil para melhorar o desempenho animal e a tolerância ao calor. Este cruzamento deriva um fenótipo de pelo preto curto e elevada produção de calor metabólico, combinação que desafia a termorregulação do gado em regiões quentes e ensolaradas, especialmente aqueles mantidos desprotegidos contra a radiação solar. Neste estudo, mensuramos o equilíbrio e as respostas autonômicas de 12 bovinos cruzados (Nelore x Angus) expostos à radiação solar ( $n = 6$ ; peso médio  $564,94 \pm 41,17$  kg) e mantidos a sombra ( $n = 6$ ; peso médio  $553,64 \pm 38,04$ ). Eles foram avaliados em períodos de 24 horas, de dezembro de 2020 a janeiro de 2021. As respostas fisiológicas foram medidas por meio de sistema de respirometria de fluxo com máscara facial não ventilada incorporada a espirômetro e sensores de temperatura e pressão de vapor d'água. Quando a irradiância solar foi superior a  $900 \text{ W m}^{-2}$ , os bovinos expostos ao sol absorveram até  $599 \text{ W m}^{-2}$  de radiação solar de ondas curtas, enquanto os que estavam à sombra absorveram  $127 \text{ W m}^{-2}$ . Nestas circunstâncias, os primeiros tinham uma temperatura do pelo mais elevada ( $42,5$  vs.  $35$  °C), o que, por sua vez, resulta em taxas mais elevadas de transferência de calor para o ambiente através da radiação de ondas longas ( $66,5$  vs.  $-4 \text{ W m}^{-2}$ ) e da convecção superficial ( $66$  vs.  $37 \text{ W m}^{-2}$ ). Os bovinos expostos ao sol aumentaram a demanda de perda de água por evaporação respiratória ( $19$  vs.  $5 \text{ W m}^{-2}$  ou  $190$  vs.  $56 \text{ g h}^{-1}$ ) e cutânea ( $140$  vs.  $53 \text{ W m}^{-2}$  ou  $1460$  vs.  $555 \text{ g h}^{-1}$ ). Mesmo assim, apresentaram maior oscilação da temperatura retal ao longo do dia ( $0,84$  vs.  $0,23$  °C) em relação aos que estavam à sombra. Em conclusão, os bovinos cruzados (Nelore x Angus) expostos ao sol podem absorver até 78 % mais radiação térmica de ondas curtas do que os que estão à sombra. Embora tenham conseguido manter a homeotermia, é provável que os bovinos expostos ao sol necessitem de até  $8,5 \text{ kg dia}^{-1}$  de água a mais do que se estivessem à sombra, a fim de sustentar os aumentos (70%) da perda de água evaporativa cutânea e respiratória.

**Palavras-chave:** bovinocultura de corte, equilíbrio térmico, perda de calor latente, sombra, radiação absorvida.

## IMPACT OF SOLAR IRRADIANCE ON THE THERMAL BALANCE AND AUTONOMIC RESPONSES OF NELORE × ANGUS CROSSBRED CATTLE

**Abstract:** The crossing between *Bos indicus* Nellore and *Bos taurus* Angus cattle have been employed by beef producers in Brazil to enhance animal performance and heat tolerance. This cross derives a black-short-haired and a high producing metabolic heat phenotype, a combination that may still challenge cattle thermoregulation in hot-sunny regions, especially those kept unprotected against solar radiation. In this study, we measured the heat balance and autonomic responses of 12 Crossbred male cattle (Nellore x Angus) kept exposed to solar radiation (n = 6; average weight  $564.94 \pm 41.17$  kg) and shaded (n = 6; average weight  $553.64 \pm 38.04$ ). They were evaluated in 24-hour periods from December 2020 to January 2021. The physiological responses were measured using a flow respirometry system with a non-ventilated face mask incorporated into a spirometer, and temperature and water vapor pressure sensors. The meteorological variables were recorded continuously. When solar irradiance were above  $900 \text{ W m}^{-2}$ , sun exposed cattle absorbed up to  $599 \text{ W m}^{-2}$  by short-wave solar radiation, while those shaded  $127 \text{ W m}^{-2}$ . Under such circumstances, the former had higher hair-coat temperature ( $42.5$  vs.  $35$  °C), which in turn, results on higher rates of heat transference to the environment through long-wave radiation ( $66.5$  vs.  $-4 \text{ W m}^{-2}$ ) and surface convection ( $66$  vs.  $37 \text{ W m}^{-2}$ ). Sun exposed cattle increased demand for respiratory ( $19$  vs.  $5 \text{ W m}^{-2}$  or  $190$  vs.  $56 \text{ g h}^{-1}$ ) and cutaneous ( $140$  vs.  $53 \text{ W m}^{-2}$  or  $1460$  vs.  $555 \text{ g h}^{-1}$ ) evaporative water loss. Even so, they had greater oscillation of rectal temperature throughout the day ( $0.84$  vs.  $0.23$  °C) against those shaded. In conclusion, the sun exposed black-haired crossbred cattle (Nellore × Angus) can absorb up to 78 % more thermal radiation than those in shade. Although they were able to keep homeothermy, sun exposed cattle are likely to require up to  $8.5 \text{ kg day}^{-1}$  more water than if they were in shade in order to sustain increments on (70%) cutaneous and respiratory evaporative water loss.

**Keywords:** absorbed radiation, beef cattle, latent heat loss, shade, thermal balance.

# 1 CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

## 1.1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a produção mundial de alimentos de origem animal deve crescer significativamente até 2050 para atender aos padrões alimentares em evolução. Sem dúvidas, o Brasil, sendo detentor do maior rebanho comercial global de bovinos desempenha um papel vital. Uma parcela considerável (~ 18%) dos bovinos abatidos no Brasil é terminada em sistemas de confinamento. Normalmente, eles são mantidos em currais sem acesso a estratégias ambientais para mitigar o estresse térmico e são alimentados com dietas de alta energia.

As condições meteorológicas tipicamente encontradas nas regiões tropicais impõem desafios adicionais à produção de bovinos de corte devido ao estresse térmico por calor. Em síntese, bovinos são expostos ao estresse térmico por calor quando os mecanismos de transferência de calor sensível (e.g., condução, convecção e radiação) para o ambiente não são suficientes para compensar as taxas de calor produzido pelo metabolismo e absorvido do ambiente. Por exemplo, temperaturas do ar e/ou radiante elevadas, muitas vezes próximas ou superiores a temperatura superficial dos animais reduz a eficiência dos mecanismos sensíveis de transferência de calor para o ambiente, e, em muitas ocasiões, representam meios de absorção de calor. Sob tais circunstâncias, a termólise do animal depende exclusivamente da perda de água corporal, resultando na transferência de calor evaporativo pelo trato respiratório superior e superfície cutânea.

A depender da intensidade e duração da exposição ao estresse térmico por calor, as quais são prováveis de serem aumentadas com os avanços rápidos das mudanças climáticas, a saúde, o bem-estar e eficiência produtiva dos animais serão comprometidos. Além disso, o nível de produção de calor metabólico, propriedades físicas e ópticas da capa de pelame, manejo nutricional (e.g., nível energético das dietas), estágio fisiológico (e.g., crescimento ou terminação), nível de performance, dias em confinamento e condições de manejo (e.g., desenho das instalações, atividades de rotina), entre outros, também irão influenciar como bovinos responderão aos eventos de estresse térmico por calor.

A combinação desses fatores afeta o balanço de calor entre animal e seu ambiente, o qual representa o equilíbrio entre a taxa de produção de calor interna, ganho de calor do ambiente, mais as perdas de calor para o ambiente. A absorção de radiação térmica na superfície cutânea é uma importante fonte de ganho de calor, especialmente para bovinos mantidos em áreas sem disponibilidade de sombreamento, frequentemente excedendo sua produção de calor metabólico. Contudo, estudos que quantifiquem o impacto do ganho de calor por radiação de ondas curtas sobre o equilíbrio térmico de bovinos são escassos. Ademais, a maioria das pesquisas sobre o equilíbrio térmico em bovinos tem sido realizada em condições de ambientes controlados (e.g., câmaras climáticas) considerando apenas os efeitos da temperatura e umidade do ar, uma abordagem que não representa a complexidade do ambiente térmico enfrentado pelos animais em condições de campo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Caracterização do sistema de produção de bovinos de corte

As projeções indicam que a produção de alimentos deve aumentar em 51% até 2050 para atender os novos padrões alimentares da população mundial (Van Dijk et al., 2021), sendo previsto um crescimento de 63% (de 64,6 para 93,3 milhões de toneladas) na produção de carne bovina para o mesmo período (Revel, 2015). Neste contexto, o Brasil apresenta importante relevância, uma vez que possui o maior rebanho comercial do mundo, com aproximadamente 203 milhões de cabeças, sendo responsável por 17,8% da carne exportada mundialmente (USDA, 2024). Só no ano de 2022 foram abatidos 42,31 milhões de cabeças e produzidas 10,79 milhões de toneladas equivalente carcaça (ABIEC, 2023).

A produção de bovinos de corte no Brasil é realizada majoritariamente à pasto, ocupando uma área de 154 milhões de hectares, com taxa de lotação média de 1,32 cabeças por hectare (ABIEC, 2023). O pasto, por ser um recurso alimentar de menor custo, faz da carne brasileira um produto competitivo no mercado externo. Aproximadamente 60% das áreas de pasto correspondem a pastagens cultivadas, onde 85% são do gênero Braquiária (Jank et al., 2014). No geral, quando comparada com espécies de climas temperados, forrageiras tropicais apresentam baixos níveis de proteína e concentração elevada de fibra (Reis et al., 2018), tendo máxima produção de biomassa concentrada no período chuvoso (~ 80%). Assim, em muitas regiões, a sazonalidade na disponibilidade e qualidade dos pastos é um dos principais fatores que afeta desempenho animal e a dinâmica de mercado da carne.

A terminação de bovinos em confinamento visa, portanto, melhorar os índices produtivos (e.g., redução de idade ao abate, características de carcaça etc.), uso da terra, melhor controle da saúde e dos indicadores econômicos (Cota et al., 2014; Grooms e Kroll, 2015; Soares et al., 2022). De 2000 a 2022, registrou-se crescimento notável de 150 % no número de bovinos terminados em confinamento. No ano de 2022, do total de bovinos abatidos, 7,62 milhões de cabeças (18,2%) foram oriundas de sistemas de confinamento (ABIEC, 2023). Consultores nutricionais de

confinamentos brasileiros, responsáveis por gerenciar aproximadamente 4,7 milhões animais, reportaram que nesse sistema, os animais são, em sua maioria, mantidos em currais de terminação por um período médio de 66 até 110 dias (Silvestre et al., 2021). Durante esse tempo, eles recebem dietas contendo de 70 a 90% de concentrado. Quanto a composição genética do rebanho, os consultores reportaram que em 85% das operações são utilizados bovinos da raça Nelore (*Bos indicus*), e em 52% é usado algum tipo de cruzamento.

Aproximadamente 80% do rebanho nacional é formado por bovinos da raça Nelore e seus híbridos (Carvalho et al., 2014). Uma menor taxa metabólica (Hansen, 2004; Moura et al., 2021), menor resistência dos tecidos corporais à transferência de calor para o ambiente (Finch, 1986; Da Silva et al., 2003), maior relação área de superfície/volume (Hansen, 2004), maior densidade e volume de glândulas sudoríparas, e uma superfície cutânea que propicie maior proteção contra a radiação solar (Da Silva et al., 2003; Tuner, 1980) são algumas das características observadas em bovinos Nelore e que, por sua vez, os tornam melhor adaptados as condições de clima tropical quando comparados com bovinos de raças taurinas. Em contrapartida, sob condições adequadas de nutrição, manejo e ambiente, raças taurinas apresentam melhores índices produtivos (e.g., ganho de peso, peso de carcaça) e são fisiologicamente mais precoces (Sartori et al., 2010).

Cruzamentos industriais têm assim ganhado cada vez mais importância nos sistemas de produção de carne bovina no Brasil, em especial, o cruzamento entre Nelore e Angus. Essa estratégia visa obter animais  $F_1$  mais produtivos e mais adaptados as condições de clima tropical, por meio da heterose (Rodrigues et al., 2011). Por exemplo, Dallatonia et al. (2021) observaram que touros cruzados ( $F_1$ , Nelore  $\times$  Angus) apresentaram maior ganho de peso (1,22 vs. 0,95 g dia<sup>-1</sup>) e foram mais pesados (529,8 vs. 458,2 kg) ao final do período de terminação que os touros Nelore puro. Moura et al. (2021) verificaram que animais cruzados ( $F_1$ , Nelore  $\times$  Angus) apresentaram respostas de termorregulação similares aos Nelore, quando expostos a uma faixa de temperatura do ar variando de 16 a 31 °C e protegidos da radiação solar, mesmo tendo uma taxa de produção de calor metabólico quase duas vezes maior.

## 2.2 Desafios meteorológicos enfrentados por bovinos em confinamentos

Estima-se que o rebanho mundial de bovinos seja de aproximadamente 1,47 bilhões de cabeças (FAO, 2024), dos quais 67% vivem em regiões tropicais (Herrero et al., 2010), caracterizada por condições meteorológicas desafiadoras (Da Silva e Maia, 2013). Na Figura 1 estão apresentados valores médios de irradiância solar e temperatura máxima do ar, registrados em confinamentos localizados nas cidades de Bebedouro (São Paulo, Brasil; latitude:  $-20,9^\circ$ ), Cuiabá (Mato Grosso, Brasil; latitude:  $-15,6^\circ$ ) e El Centro (Califórnia, Estados Unidos; latitude:  $32,8^\circ$ ). A depender da época do ano, tanto em regiões tropicais quanto não tropicais, bovinos confinados podem ser expostos a níveis de irradiância solar variando de 500 a  $1000 \text{ W m}^{-2}$ , temperatura do ar acima de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , e temperatura radiante média superior a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

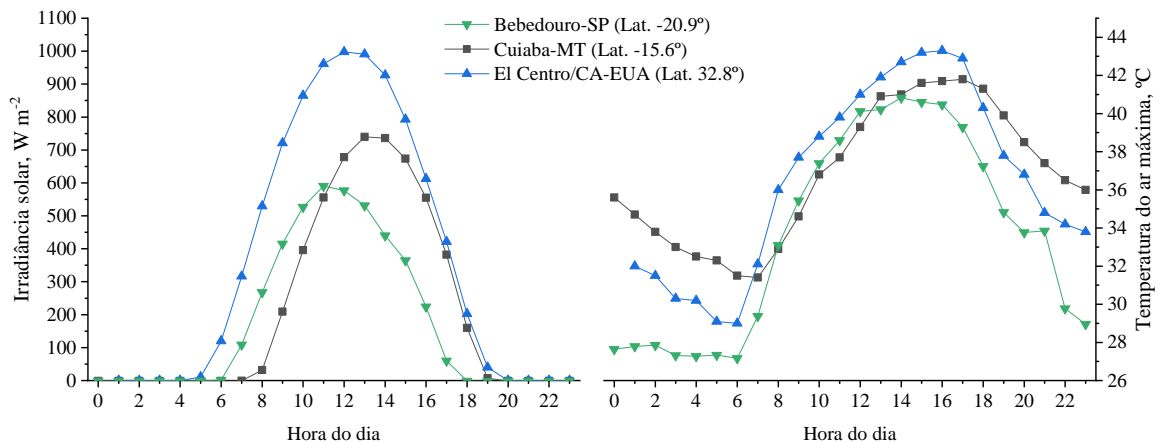


Figura 1 Média de irradiância solar e temperatura máxima do ar nas 24 horas, no mês de julho de 2023, para as cidade de Bebedouro-SP, Cuiabá-MT e El Centro no Estado da Califórnia, Estados Unidos. Fonte: Os dados de Cuiabá foram baixados através do site do INMET, 2024; Os dados de Bebedouro e El Centro são do próprio autor.

Sem dúvida, tais condições meteorológicas são desafiantes para termorregulação animal. Por exemplo, ao investigar o equilíbrio térmico de vacas Holandesas expostas a uma faixa de temperatura do ar de 10 a  $36 \text{ }^\circ\text{C}$ , Maia et al. (2005) observaram que a partir dos  $32 \text{ }^\circ\text{C}$ , houve influxo de calor do ambiente para o animal por meio dos mecanismos de transferência de calor sensível como radiação e convecção. De maneira similar, Camerero et al. (2016) reportaram que o fluxo de calor sensível para o ambiente em bovinos da raça Guzerá diminuiu de  $70$  para  $20 \text{ W m}^{-2}$

quando a temperatura do ar aumentou de 25 para 34°C. Em ambos os casos, os animais estavam protegidos da radiação solar. Esses resultados deixam claro que, em muitos horários do dia, os níveis de temperatura do ar enfrentados por bovinos confinados em diferentes regiões do planeta excedem a capacidade desses animais transferirem calor para o ambiente através de mecanismos sensíveis.

Além da ineficiência na perda de calor por convecção e radiação de ondas longas, esses animais também absorvem calor na superfície através da radiação de ondas curtas. Em ambientes tropicais, Da Silva et al. (2010) observaram que vacas holandesas predominantemente pretas, sem acesso à sombra, absorviam um total de 640 W m<sup>-2</sup> por radiação, sendo 298 W m<sup>-2</sup> de radiação de ondas curtas (direta, difusa e refletida) e 342 W m<sup>-2</sup> de radiação de ondas longas (emitida pelo céu e vizinhança). Esses animais podem assim absorver uma quantidade de radiação térmica até 2,5 vezes maior que sua taxa de produção de calor metabólico (estimada em 250 W m<sup>-2</sup>). E mesmo com acesso à sombra, a qual atenua boa parte do ganho de calor por radiação de ondas curtas direta, animais absorvem uma quantidade significativa de radiação difusa e refletida pela vizinhança (Berman e Horovitz, 2012).

Diante dessas condições, bovinos dependem quase que exclusivamente da perda de calor latente para manter seu equilíbrio térmico. A evaporação cutânea pode representar de 60 a 80% da dissipação do calor metabólico (Maia et al., 2005; Moura et al., 2021). Entretanto, a eficácia da evaporação do suor requer um diferencial de pressão de vapor entre a superfície do animal e ambiente. Gebremedhin e Wu (2002) ao modelarem a perda de calor latente, demonstraram uma redução de aproximadamente 300 para 150 W m<sup>-2</sup> quando a umidade do ar variou de 20 para 80%.

Adicionalmente, bovinos em confinamentos podem enfrentar ondas de calor, definidas como "*período de clima anormalmente quente e úmido com duração de três a cinco dias sucessivos*" (AMS, 1989). Historicamente, tais eventos resultaram na morte de milhares de animais e prejuízos econômicos significativos para o setor de produção de bovinos de corte ao redor do mundo (St-Pierre et al., 2003). Recentemente, em 2022, uma onda de calor no estado do Kansas, EUA, com temperaturas variando entre 40 e 50 °C, levou à morte de aproximadamente 10.000 bovinos, a maioria da raça Angus de pelagem preta (Myers, 2022). Durante a

ocorrência desses eventos extremos, além das condições térmicas extremas enfrentadas no período diurno (e.g., irradiância solar, temperatura e umidade do ar elevadas), a noite, os animais são expostos a temperatura do ar relativamente alta, dificultando a transferência do calor estocado durante o dia (Hahn, 1997). Isso parece ser a principal causa de os animais sucumbirem ao estresse térmico por calor durante esses eventos. Durante e após eventos de ondas de calor, nos casos menos extremos, bovinos em confinamento terão seu bem-estar comprometido pela maior probabilidade de serem acometidos por problemas como alcalose respiratória, acidose metabólica, redução do consumo de alimentos e perda de peso (Beatty et al., 2006).

### **2.3 Fatores de risco ao estresse térmico**

A resposta dos bovinos às condições meteorológicas é influenciada por uma combinação de características individuais, fatores de manejo e ambientais. Brown-Brandl et al. (2011) observaram uma variabilidade marcante da frequência respiratória de bovinos de corte confinados, evidenciada pela diferença de aproximadamente 80 resp.  $\text{min}^{-1}$  entre dois animais (3140 e 7020; Figura 2), mantidos nas mesmas condições de ambiente térmico. Assim, temos dois questionamentos importantes: 1) Quais fatores podem influenciar ou aumentar a suscetibilidade de bovinos de corte ao estresse térmico? 2) Como identificar precocemente animais que possam estar em risco durante eventos de calor e realizar ações para minimizar comprometimento do bem-estar animal, perdas zootécnicas e econômicas?

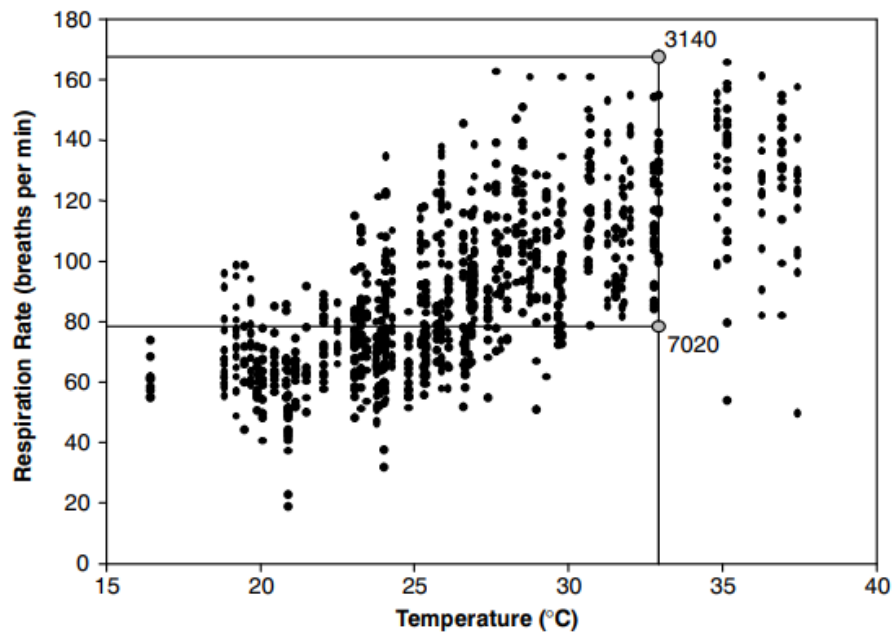


Figura 2 Frequência respiratória (resp.  $\text{min}^{-1}$ ) de bovinos de corte em confinamento comercial, registrada durante três meses durante o verão, como função da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os dois pontos indicados representam uma novilha da raça Charolês com pelame branco-creme (7020) e uma novilha Angus de pelame preto (3140). Fonte: Adaptado de Brown-Brandl et al., (2011).

### 2.3.1 Propriedades físicas e ópticas da superfície cutânea dos animais

A capa de cobertura nos bovinos tem influência direta nos processos de transferência de calor e massa com o ambiente, pois constituem a principal interface entre animal e seu entorno. As propriedades físicas (e.g., densidade, comprimento e ângulo de inclinação dos pelos) e ópticas (e.g., absorvância, refletância e transmitância) da pele e pelame determinam a quantidade de calor absorvido por radiação de ondas curtas. Pelames pretos possuem maior absorvância (0,93 vs. 0,46) da radiação de ondas curtas (no comprimento de onda de 300 a 850  $\mu\text{m}$ ) em comparação aos de cor branco/acinzentada (Da Silva et al., 2003). Isso implica que, quando expostos a irradiância solar de ondas curtas, bovinos de pelagem preta como Angus ou seus cruzamentos, absorvem aproximadamente o dobro de radiação que um animal Nelore de pelo branco/acinzentado. Em contrapartida, pelames e peles claras permitem maior transmitância da radiação, especialmente aquela dentro do espectro ultravioleta (comprimento de onda de 260 a 360  $\mu\text{m}$ ), um fator de risco ao desenvolvimento de queimaduras e câncer de pele (Silva et al., 2003; Mathewos et al., 2020). Portanto, uma combinação de pelagem e epiderme despigmentada, comum

em bovinos da raça Holandês e Charolês é menos vantajosa, especialmente em ambientes com oferta limitada de sombra (Da Silva e Maia, 2013).

O pelame de raças de bovinos *Bos taurus* é tipicamente mais espesso, denso e com pelos mais longos que os de raças de bovinos *Bos indicus*, proporcionando assim maior isolamento e resistência a transferência de calor para o ambiente (Gebremedhin et al., 2023). Portanto, a combinação pelagem escura e maior resistência à transferência de calor através da capa de pelame contribui para que bovinos *Bos taurus*, como os da raça Angus, apresentem maior susceptibilidade ao estresse térmico. De fato, historicamente, as maiores taxas de mortalidade durante eventos de calor extremo são de bovinos com essas características (Hungerford et al., 2000).

### 2.3.2 Alterações ambientais como estratégia de mitigação do estresse térmico

Bovinos de corte em confinamento são frequentemente mantidos sem acesso à sombra ou quaisquer estratégias de manejo que possam mitigar o estresse térmico. Estudos realizados com consultores nutricionais de confinamentos nos Estados Unidos (Samuelson et al., 2016; Simroth et al., 2017) indicaram que, apesar de os produtores reconhecerem a importância de estratégias de manejo para combater o estresse térmico, apenas 5% das operações de confinamento dispunham de estruturas de sombreamento nos currais de recebimento e 20% nos currais de terminação. Além disso, os autores também observaram que 39% dessas operações utilizavam sistemas de aspersão de água, embora o objetivo principal fosse controle da poeira. No Brasil, há uma carência de dados específicos sobre adoção de estratégias para manejo do estresse térmico em confinamentos. A ausência de sombra para proteção nos períodos de maior irradiância solar faz com que bovinos absorvam uma quantidade substancial de calor, trazendo consequências negativas para o bem-estar e produtividade dos animais (Finch et al., 1976; Da Silva et al., 2010).

### 2.3.3 Produção de calor metabólico e manejo

Em ambientes quentes bovinos *Bos indicus* são reconhecidos por sua melhor tolerância ao calor, em parte, devido à sua menor taxa de produção de calor metabólico em comparação com os *Bos taurus* (Tunner 1980; Hansen, 2007; Moura

et al., 2021). Uma menor taxa metabólica representa menor carga de calor para o animal e, conseqüentemente, maior facilidade para manutenção do equilíbrio térmico, especialmente quando expostos a situações de desafio. Moura et al. (2021) investigaram o equilíbrio térmico de bovinos cruzados (Nelore x Angus) e Nelore, constatando que a taxa metabólica média dos animais da raça Nelore era 52% inferior à dos cruzados (Figura 3). Interessantemente, os valores registrados para os bovinos cruzados assemelhavam-se aos reportados para bovinos Angus puros, cerca de  $2,49 \text{ W kg}^{-1}$  (Ferrell e Jenkins, 1998). Essa diferença pode ser atribuída às menores demandas energéticas para manutenção nos bovinos zebuínos (Berman, 2011; NASEM, 2016), o que os torna mais eficientes sob condições ambientais desafiadoras.

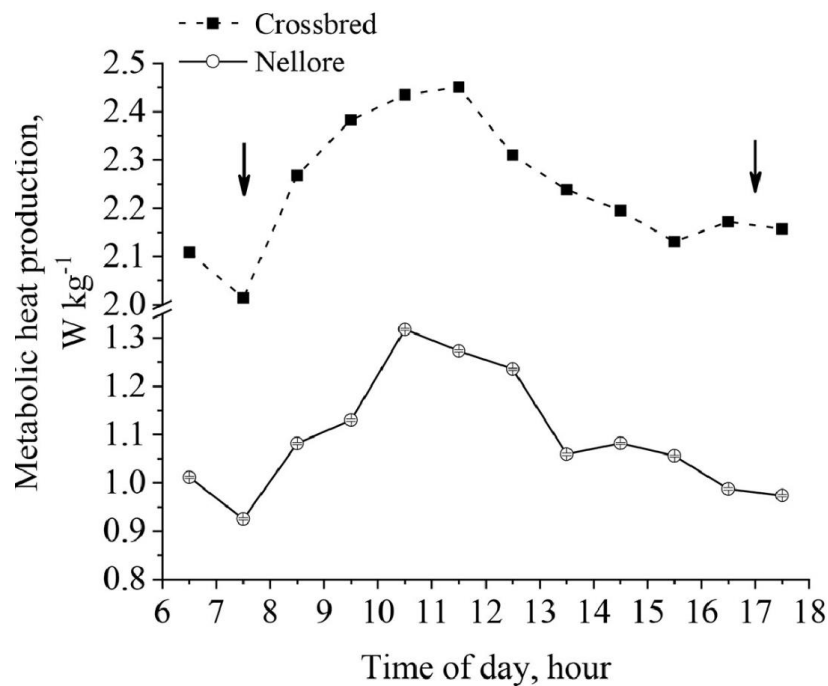


Figura 3 Produção de calor metabólico de bovinos Nelore e cruzados (Nelore x Angus), como função da hora do dia. As setas indicam horário de fornecimento da ração, às 7:30h e 19:00h. Fonte: Adaptado de Moura et al. (2021).

Bovinos em confinamento são alimentados com dietas de alta energia, o que leva a um aumento na produção de calor metabólico. Estima-se que cerca de 70 a 90% da energia metabolizável ingerida seja transformada em calor, devido aos processos relacionados a ingestão, digestão e absorção dos nutrientes, manutenção das atividades vitais e atividade/locomoção (Chizotti et al., 2008; Crossland et al., 2018). Este processo pode se tornar menos eficiente sob condições de estresse

térmico por calor, resultando numa perda energética ainda maior (NASEM, 2016; Crossland et al., 2018). Moura et al. (2021) investigaram o equilíbrio térmico de bovinos Nelore e cruzados (Nelore x Angus) alimentados com dietas contendo cerca de 60% de concentrado. Esses autores observaram que o pico da produção metabólica de calor ocorria de duas a quatro horas após a alimentação da manhã (veja a Figura 3). Esse aumento está relacionado à alta taxa de degradação de carboidratos não fibrosos, devido à inclusão significativa de grãos na dieta, levando a um incremento calórico associado aos processos de fermentação, digestão e absorção de nutrientes.

Esse pico de calor metabólico coincide, portanto, com os períodos de maior irradiância solar e temperaturas do ar e radiante elevadas, resultando em ganho adicional de calor do ambiente, especialmente em circunstâncias de ausência de estruturas de sombreamento. Barjas et al. (2013) avaliaram o impacto de diferentes estratégias de alimentação (70% do total fornecido no período da manhã ou tarde) e a interação com a disponibilidade de sombra (presença ou ausência). Os autores constataram que a sombra melhorou ganho de peso diário em 14%, a eficiência de ganho em 10% e a energia líquida de ganho em 6%, em comparação com animais sem acesso à sombra. Além disso, entre os animais sem sombra, aqueles que receberam 70% da dieta durante a tarde (14h30) tiveram um maior ganho de peso (22%), maior eficiência de ganho (14%) e mais energia líquida para ganho (6%).

Na Figura 4, observa-se as necessidades de energia metabolizável para animais com 350 e 550 kg, em função do seu nível de ganho de peso diário, junto à produção de calor estimada. Para ambos os pesos corporais, à medida que o ganho de peso aumenta, as necessidades de energia metabolizável e a produção de calor também aumentam. Isso implica que animais com maior ganho de peso precisam lidar com uma maior produção de calor, que se soma ao ganho de calor do ambiente em dias quentes. Isso explica, portanto, a maior susceptibilidade desses animais quando expostos a eventos de calor extremo, quando comparados com animais de baixo nível de produção. Para comparação, um animal com ganho médio diário de 1,6 kg produz 62 % mais calor que os com média de 0,2 kg dia<sup>-1</sup> de ganho.

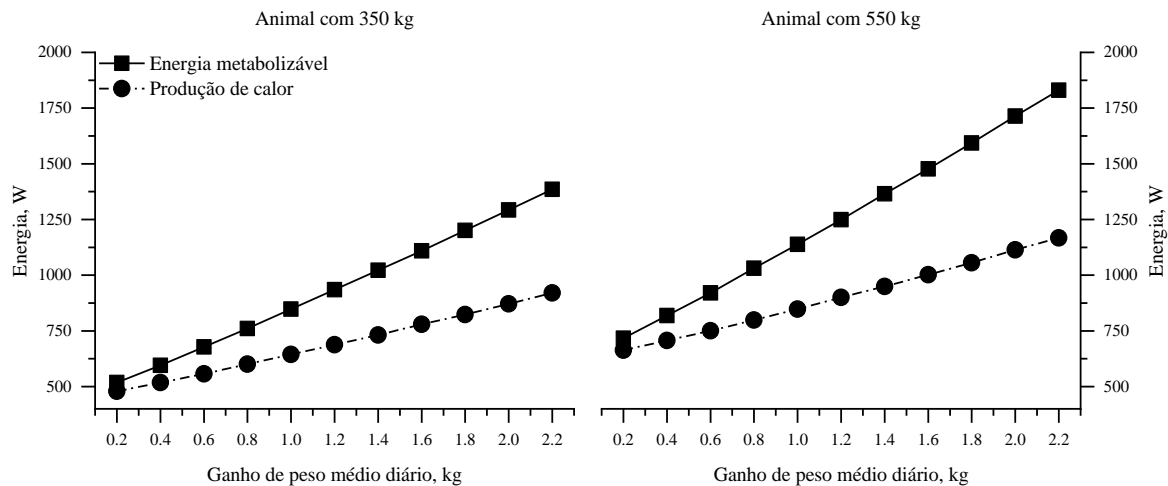


Figura 4 Requerimentos de energia metabolizável e estimativa da produção de calor, para animais com 350 e 550 kg de peso vivo da raça Nelore, como função do ganho de peso médio diário. Os valores diários em Mcal foram transformados em W. Fonte: as equações utilizadas para estimativas estão de acordo com BRCORTE, 2023.

## 2.4 O balanço de calor e seus componentes

Bovinos são sistemas abertos, isto é, trocam continuamente energia e massa com seu ambiente. De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica ou Lei de conservação de energia, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de uma forma para outra. Os bovinos obtêm energia por meio da ingestão dos alimentos. No processo de fermentação e digestão carboidratos, proteínas e gorduras são degradados às suas unidades mais simples, possibilitando sua assimilação e uso da energia para manutenção e síntese de novos tecidos. Em síntese, o fluxo de energia através de um bovino pode ser descrito da seguinte forma. Durante a ingestão, fermentação, digestão, absorção, assimilação dos nutrientes, síntese de novos tecidos e manutenção das atividades vitais, uma porção significativa da energia química é perdida na forma de dejetos (fezes e urina), produção de gases ( $\text{CH}_4$ ) e calor. A energia restante é denominada energia metabolizável e está prontamente disponível para atender as necessidades de manutenção (i.e., atendimento das funções vitais de manutenção da vida) e produção (i.e., crescimento, produção de leite e ovos, reprodução etc.).

O calor gerado durante esses processos é um subproduto das reações químicas que ocorrem no organismo e desempenha um papel crucial na regulação

térmica. Os bovinos são classificados como animais homeotérmicos e endotérmicos, ou seja, possuem a capacidade de regular a produção de calor interno necessário para manutenção da sua temperatura corporal em níveis estreitos de variação, independente das condições do ambiente. A variação da sua temperatura interna será então dada pelo balanço de energia térmica entre animal e seu ambiente. Assim, aplicando o balanço de energia por meio da primeira Lei da Termodinâmica, para um dado instante de tempo, temos que a variação da quantidade de energia armazenada em um volume de controle deve ser igual à quantidade de energia gerada no interior do volume de controle, mais a que entra no volume de controle, menos a quantidade de energia que deixa o volume de controle, podendo ser expressa pela seguinte equação:

$$\Delta_{ACU} = E_G + E_N - E_S$$

onde  $\Delta_{ACU}$  é a variação da energia acumulada durante um intervalo de tempo ( $J s^{-1}$ );  $E_G$  é a energia gerada no volume de controle ( $J s^{-1}$ );  $E_N$  é a energia que entra no sistema ( $J s^{-1}$ ) e  $E_S$  é a energia que deixa o sistema ( $J s^{-1}$ ). De acordo com Silva e Maia (2013), aplicando a equação acima para um bovino, temos:

$$S + M + T \pm L \pm C_S - C_R \pm K - E_S - E_R = 0$$

onde  $S$  é o ganho efetivo por radiação de ondas curtas,  $M$  é a taxa metabólica,  $T$  é a taxa de energia térmica armazenada nos tecidos,  $L$  é a taxa de transferência de calor por radiação de ondas longas,  $C_S$  é a taxa de transferência de calor por convecção,  $K$  é a taxa de transferência de calor por condução e  $C_R$ ,  $E_S$  e  $E_R$  são as taxas de perda de calor por convecção respiratória, evaporação cutânea e evaporação respiratória, respectivamente (Figura 5). Note que  $L$ ,  $C_S$ ,  $K$  e  $C_R$  podem ser fontes de entrada e saída de calor,  $S$  é apenas fonte de entrada de calor, enquanto  $E_S$  e  $E_R$  representam apenas fontes de saídas de calor.

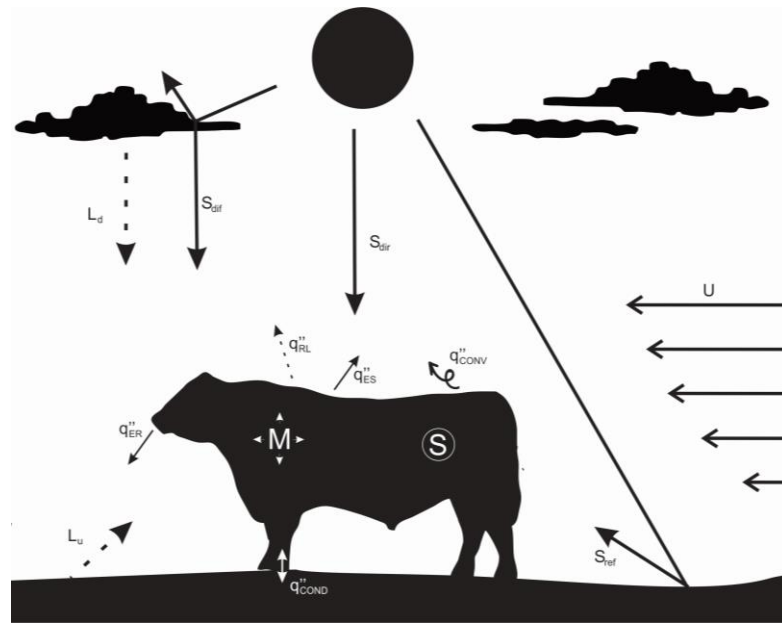
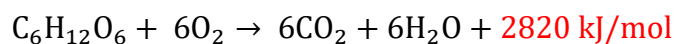


Figura 5 Balanço de calor de um bovino a campo.

#### 2.4.1 Produção de calor metabólico

A taxa metabólica ou produção de calor metabólico, é definida como a taxa com que um animal consome energia para sustentar suas funções vitais, que conseqüentemente é convertida em calor e trabalho. Uma das metodologias empregadas para medir a produção de calor metabólico em animais é a calorimetria indireta. A calorimetria indireta, permite estimar a taxa metabólica baseado na relação de proporcionalidade entre a quantidade de oxigênio consumido e dióxido de carbono produzido pelo metabolismo aeróbico e quantidade de calor produzido, resultante da combustão completa de carboidratos, proteínas e lipídeos. Por exemplo, quando um mol de glicose é completamente oxidado, seis mols de oxigênio ( $O_2$ ) são consumidos, seis mols de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) são produzidos e  $2820 \text{ kJ mol}^{-1}$  de calor são liberados (ver a equação estequiométrica abaixo). Essa relação é mais ou menos fixa, independente dos passos intermediários que ocorrerem no metabolismo energético do animal.



Assim, a partir dessa relação é possível determinar a produção de calor metabólico de um animal pela quantificação do consumo de oxigênio e produção de

dióxido de carbono. Por exemplo, para um animal consumindo  $50 \text{ mL min}^{-1}$  de oxigênio, considerando um coeficiente calórico (calor produzido por unidade oxigênio consumido) de  $21,1 \text{ J/mL}$ , a taxa de produção de calor desse animal seria de  $1055 \text{ J min}^{-1}$ . Baseados nesse princípio, Maia et al. (2014), desenvolveram um sistema de calorimetria indireta com máscara facial não ventilada acoplada a um espirômetro para quantificar os gases respiratórios, funções respiratórias e as demais variáveis necessárias para calcular a produção de calor metabólico e o balanço de calor em animais. Esse sistema já foi utilizado em pesquisas com aves (Nascimento et al., 2017), bovinos (Camerro et al., 2016; De Melo Costa et al., 2021; Moura et al., 2021), caprinos (Maia et al., 2013) e ovinos (Fonseca et al., 2019) (Figura 6).

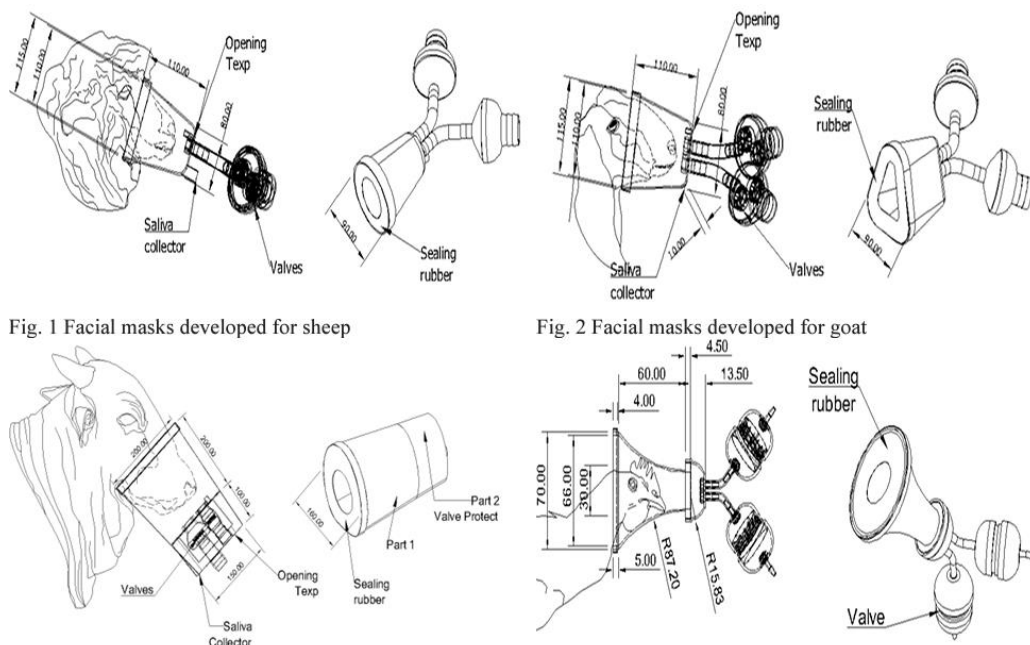


Figura 6 Diferentes configurações de máscaras faciais, de acordo com a espécie animal, para uso com sistema de calorimetria indireta. Fonte: Adaptado de Maia et al. (2014).

O sistema é composto por três módulos, um módulo para avaliação das funções respiratórias (frequência respiratória, ventilação e volume corrente), outro para análise dos gases (pressão de vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono e metano) e um terceiro para avaliação das temperaturas corporais (temperatura retal, do ar expirado, epiderme e da superfície do pelame). De maneira geral, para medida dos gases e funções respiratórias, o sistema funciona com uso de uma máscara com válvula

direcional, separando ar expirado e inspirado pelo animal. Uma amostra desse ar é retirada para determinação da pressão de vapor e, após seco, das proporções de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Com esses dados, a produção de calor metabólico pode ser então calculada pela equação:

$$q''_{\text{MET}} = \frac{16180VO_2 + 5160VCO_2 + 2420VCH_4}{A_N}$$

onde 16180, 5160 e 2420 são os coeficientes calóricos para o oxigênio, dióxido de carbono e metano, respectivamente; o VO<sub>2</sub> é o volume consumido de oxigênio (L s<sup>-1</sup>), VCO<sub>2</sub> é o volume emitido de dióxido de carbono (L s<sup>-1</sup>), VCH<sub>4</sub> é o volume emitido de metano (L s<sup>-1</sup>), A<sub>N</sub> é a área superficial do animal. Uma das grandes vantagens desse sistema é que permite avaliar e determinar o equilíbrio térmico em condições de campo, onde a relação das variáveis meteorológicas com os animais é muito mais complexa que aquela produzida em câmaras climáticas.

#### 2.4.2 Condução

A condução é definida como a transferência de calor de partículas (e.g., átomos, moléculas) mais energéticas para partículas menos energéticas devido contato físico entre elas, ocorrendo predominantemente dentro de um mesmo corpo ou entre corpos em contato (Incropera, 2014). Por meio da aplicação da Lei de Fourier ou equação geral da difusão do calor, a taxa de transferência de calor por condução (J s<sup>-1</sup>) é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre as superfícies envolvidas, área de contato e capacidade da matéria em conduzir calor (i.e., condutividade térmica), sendo inversamente proporcional a distância entre os meios envolvidos. Embora seja um mecanismo fundamental de transferência de calor, a condução é normalmente desprezada ao se determinar o equilíbrio térmico de um bovino em pé, devido sua área reduzida de contato com o solo (Da Silva e Maia, 2013; Figura, 5). Em confinamentos com ausência de sombra, a temperatura do solo será maior que a da superfície do animal (Maia et al., 2023) nos horários de maior intensidade de irradiância solar e, como consequência, o animal reduzirá o tempo despendido deitado para reduzir ganho de calor por condução. Nessas condições, sua quantificação em condições de campo é complexa, pois é necessário determinar a

área de superfície do animal em contato com o solo, perfil de temperatura do solo e da superfície do pelame do animal em contato com o solo.

#### 2.4.3 Convecção

A convecção ocorre pela transferência de calor entre uma superfície em contato com um fluido em movimento, o qual pode ser gasoso ou líquido (Da Silva e Maia, 2013). Com base na Lei do resfriamento de Newton, a taxa de transferência de calor por convecção através de uma superfície qualquer é diretamente proporcional a diferença de temperatura (superfície – fluido) e a um coeficiente de proporcionalidade, o qual é função da velocidade de deslocamento do fluido e dimensão característica da superfície. A convecção pode ser classificada como natural, forçada ou combinada. Quando o deslocamento do fluido ocorre devido a diferenças de densidade do fluido, a convecção é natural (Çengel, 2012). Já a convecção forçada ocorre mediante ação de forças externas (i.e., correntes de ar ou água), as quais promovem arrasto do fluido em contato com a superfície (Da Maia e Silva, 2013); no processo combinado, os dois processos, natural e forçado, ocorrem simultaneamente.

#### 2.4.4 Radiação

Radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas e, diferente dos outros mecanismos de transferência de calor, não depende da presença de matéria para sua propagação (Çengel, 2012). Sempre que a temperatura de um corpo for maior que zero ( $> 0$  K), ondas eletromagnéticas serão emitidas devido deslocamento de elétrons (i.e., saltos quânticos) na eletrosfera de um átomo. A quantidade energia eletromagnética (Joules) emitida por um átomo quando um elétron salta de uma camada eletrônica para outra é dada pelo produto da constante de Planck ( $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}^{-1}$ ) e velocidade de propagação da onda no vácuo ( $\sim 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ), a qual é produto da frequência e comprimento de onda. O número e magnitude das perturbações dos elétrons em um átomo produz o espectro eletromagnético magnético da matéria. O espectro eletromagnético de interesse para estudos envolvendo transferência de calor em animais varia de 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ , incluindo parte da radiação ultravioleta (0,01 a 0,40  $\mu\text{m}$ ), visível (0,40 a 0,76  $\mu\text{m}$ ) e infravermelho (0,76 a 100  $\mu\text{m}$ ) (Çengel, 2012). A energia térmica emitida por uma superfície está

dentro dessa faixa de comprimento de onda e é influenciada pela natureza do material, sua constituição física e temperatura (Çengel, 2012; Incropera, 2014).

A quantidade de energia emitida por um corpo é determinada pela Lei de Stefan-Boltzmann. Para quantificar a energia emitida por um corpo real, é utilizado como referência um corpo negro, que é um idealizador perfeito de emissão e absorção de radiação, ou seja, absorve e emite toda radiação que incide sobre sua superfície. A emissividade de um corpo real é calculada proporcionalmente à de um corpo negro, e a potência emissiva pode ser então determinada pela equação:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

onde E é a potência da radiação emitida por um corpo real,  $W m^{-2}$ ;  $\varepsilon$  é a emissividade do corpo em relação ao corpo negro;  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann, que é  $5,670373 \times 10^{-8} W m^{-2} K^4$ ; e  $T_s$  é a temperatura absoluta da superfície, K. A Lei de Wien desempenha um papel crucial na compreensão da relação entre a temperatura de um corpo e o comprimento de onda de radiação que ele emite. Essa lei estabelece que o comprimento de onda de máxima emissão de um corpo negro é inversamente proporcional à sua temperatura absoluta, sendo expresso pela equação:

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

em que  $\lambda_{\max}$  é o comprimento de onda de máximo poder emissivo,  $\mu m$ ; 2897,6 é a constante de deslocamento de Wien; T é a temperatura absoluta da superfície, K.

Aplicando a equação e tomando a temperatura da superfície do Sol ( $\sim 5780 K$ ), a máxima potência emissiva é emitida no comprimento de  $0,5 \mu m$ , o qual está dentro do espectro visível. Assumindo a temperatura média de  $24,85 ^\circ C$  (298 K) dos corpos encontrados na superfície da Terra, a máxima potência emissiva é emitida no comprimento de onda de  $9,72 \mu m$ , situado no espectro infravermelho. Portanto, a distribuição espectral da energia térmica emitida pelo Sol está na faixa de  $0,1$  a  $3 \mu m$ , denominada radiação de ondas curtas. Em contraste, a emissão de energia radiante por superfícies reais (e.g., animais e sua vizinhança) situa-se principalmente na faixa de  $3$  a  $100 \mu m$ , ou seja, radiação em comprimento de ondas longas. Assim, um bovino

ganha/absorve calor diretamente do sol através da absorção da radiação de ondas curtas, enquanto emite e recebe calor das superfícies circunvizinhas por meio radiação térmica em comprimento de ondas longas.

Para se obter o balanço de radiação de ondas longas do animal com sua vizinhança utiliza-se o termômetro de globo negro, que é uma esfera oca de cobre com superfície externa pintada de preto fosco e um termômetro inserido no centro para medição da sua temperatura interna (Silva, 2000). A temperatura de globo negro resulta, portanto, do efeito combinado da temperatura do ar, vento e da radiação absorvida na sua superfície proveniente do meio em todas as direções. A partir dessa medida é possível obter a média de temperatura de todas as superfícies que estão em torno do animal, convencionalmente definida como temperatura radiante média ( $T_{RM}$ , K). Utilizando princípio da Lei de Stefan-Boltzman, é possível determinar a potência emissiva da superfície do animal utilizando a temperatura da superfície do pelame e a potência emissiva das superfícies circunvizinhas utilizando a  $T_{RM}$ . Desse modo, se potência emissiva das superfícies circunvizinhas for maior que a superfície do pelame do animal, então haverá ganho líquido de calor por radiação de ondas longas pelo animal. Caso contrário, haverá transferência líquida de calor por radiação de ondas longas do animal para o ambiente.

Para quantificar o total de radiação de ondas curtas absorvida na superfície de um bovino, é necessário obter um fator de conformação ( $F_C$ ), o qual é dado pela relação da área de sombra do animal que é projetada sobre uma superfície horizontal e área total do objeto. Em outras palavras, o  $F_C$  determina quanto da área de superfície de um animal é iluminada por um feixe de radiação solar. Para animais quadrúpedes, o modelo geométrico que melhor representa é o cilindro horizontal com extremidades semiesféricas (Monteith e Unsworth, 1990; Campbell e Norman, 1998; Silva, 2008). Assim, o fator de conformação para cilindros horizontais pode ser obtido pela equação:

$$F_C = \frac{2hr [1 - (\cos^2\beta) (\cos^2\omega)]^{0,5} + \pi r^2}{2\pi r (h + 2r) \sin\beta}$$

em que,  $h$  é o comprimento do animal (m),  $r$  é o raio (m),  $\beta$  o ângulo de elevação do sol (graus) e  $\omega$  é o ângulo azimutal do animal (graus). O ganho de calor por radiação de ondas curtas ( $q_{RC}''$ ,  $W m^{-2}$ ) é então obtido pela equação:

$$q_{RC}'' = (F_C \alpha_P R_S) + (0,5 \alpha_P R_S \rho_S)$$

em que  $q_{RC}''$  é a quantidade total de energia térmica radiante absorvida,  $\alpha_P$  é o coeficiente de absorvância do pelame,  $\rho_S$  é o coeficiente de refletância da superfície do solo,  $R_S$  é a irradiância solar direta e difusa de ondas curtas ( $W m^{-2}$ ), medida com um piranômetro.

#### 2.4.5 *Transferência de calor associado à difusão do vapor de água*

A transferência de calor latente ocorre devido a energia térmica necessária (reação endotérmica) para que haja mudança no estado físico da matéria, nesse caso, transformação da água no estado líquido para vapor, um processo conhecido como evaporação. Por exemplo, são necessários aproximadamente 2429,81 J de energia para evaporar 1 g de água a uma temperatura de 30 °C. A taxa de transporte ou difusão de vapor de água ( $g m^{-2} s^{-1}$ ) entre dois meios pode ser quantificada pelo princípio da Lei de Fick, a qual, para um dado instante de tempo, determina movimento relativo de substâncias entre dois meios. A difusão de vapor de água é diretamente proporcional ao gradiente de concentração entre as superfícies envolvidas e inversamente proporcional a distância que as separam. No caso de bovinos, a evaporação pode acontecer tanto na superfície da pele quanto nas vias respiratórias. O calor necessário para que haja evaporação é proveniente do animal e do ambiente. Em síntese, o animal transfere calor sensível para a água no estado líquido, e quando esta evapora, ocorre transporte de vapor de água para atmosfera, resultando também em transferência efetiva de calor.

Diferentemente dos mecanismos de transferência de calor sensível, a força motriz para o transporte de massa é a diferença de concentração de vapor de água entre a superfície do animal e a atmosfera. A perda de calor por evaporação cutânea é extremamente importante quando a temperatura do ar é próxima ou superior à da superfície do animal, representando de 60 a 90 % da produção de calor em condições

quentes (Maia et al., 2005; Moura et al., 2021; Fonsêca et al., 2022). Diversas metodologias têm sido empregadas para determinar a transferência de calor latente na superfície cutânea de bovinos. Maia et al. (2005) desenvolveram uma cápsula ventilada (~ 10 cm de diâmetro x 4 cm de altura), a qual é passado um fluxo de ar (e.g., 1.8 L/min ou  $3,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) através da superfície cutânea do animal. Um analisador de pressão de vapor de água (RH-300, Sable System, USA) é utilizado para determinar a pressão de saturação de vapor de água a temperatura da superfície da pele animal e a pressão parcial de vapor da atmosfera. A taxa de evaporação cutânea pode ser obtida pela equação:

$$q''_{es} = \lambda \left[ \frac{F (\Psi_{EP} - \Psi_{ATM})}{A_{cap}} \right]$$

em que  $q''_{es}$  é o fluxo de calor por evaporação cutânea ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $\text{J g}^{-1}$ ),  $F$  é o fluxo de ar ( $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ ),  $\Psi_{EP}$  é a umidade absoluta da superfície cutânea ( $\text{g m}^{-3}$ ),  $\Psi_{ATM}$  é a umidade absoluta da atmosfera ( $\text{g m}^{-3}$ ) e  $A_{cap}$  é a área da cápsula ( $\text{m}^2$ ). Castro et al. (2021) e Fonsêca et al. (2022) comparam diversos métodos para quantificar a evaporação superficial, utilizando um método gravimétrico como padrão ouro. Esses autores chegaram à conclusão de que o método proposto por Maia et al. (2005) é o mais preciso.

A perda de calor latente pelo trato respiratório pode ser estudada modelando-o como tubo de comprimento finito e diâmetro específico, aplicando a teoria da transferência de calor em tubos (Silva et al., 2002). O ar inspirado entra no trato respiratório à temperatura e pressão de vapor ambiente, começa a aquecer-se à medida que flui pelo sistema respiratório superior (vias aéreas de condução), absorvendo calor e umidade via evaporação e convecção. À medida que o ar alcança os pulmões, ele se aquece até a temperatura interna do corpo e se satura de vapor de água a essa temperatura. Durante a expiração, o ar quente e saturado de vapor de água flui de volta pelo trato respiratório, entrando em contato com as paredes mais frias do tubo. Esse contato resfria o ar, fazendo com que parte do vapor de água se condense nas paredes do trato respiratório, resultando em uma perda de calor latente.

A taxa de transferência de calor por evaporação respiratória pode ser quantificada pela equação:

$$q_{ER}'' = \frac{\lambda V_E (\Psi_{EXP} - \Psi_{ATM})}{A_N}$$

em que  $q_{ER}''$  é o fluxo de calor por evaporação respiratória ( $W m^{-2}$ ),  $\lambda$  é o calor latente de vaporização ( $J g^{-1}$ ),  $V_E$  é a taxa de ventilação ( $m^3 s^{-1}$ ),  $\Psi_{EXP}$  é a umidade absoluta do ar expirado ( $g m^{-3}$ ),  $\Psi_{ATM}$  é a umidade absoluta da atmosfera ( $g m^{-3}$ ) e  $A_N$  é a área superficial do animal ( $m^2$ ). Note que para aumentar a perda de calor por evaporação respiratória, os bovinos aumentam o volume de ar que passa através do trato respiratório superior por meio do ofego. No ofego, há um aumento da frequência respiratória e redução do volume corrente (volume de ar por ciclo respiratório), resultando da  $V_E$ .

## 2.5 Balanço de calor por radiação em bovinos

Muitas pesquisas voltadas para determinar o equilíbrio térmico foram conduzidas em câmaras climáticas (Hahn et al., 1999; Gaughan et al., 1999; Brown-Brandl et al., 2005; Beaty et al., 2006; Scharf et al., 2011), focando exclusivamente no efeito combinado da temperatura do ar e da pressão de vapor, sem considerar a radiação solar. Embora índices de conforto térmico sejam desenvolvidos para sumarizar o efeito das variáveis meteorológicas sobre as repostas dos animais, muitos deles são aplicados de maneira inadequada para representar as condições ao ar livre, apesar de não incorporar os efeitos da radiação solar direta. Em relação à radiação solar, a maior parte das pesquisas concentrou-se apenas no fornecimento de sombra e seus impactos, negligenciando a influência direta dos níveis de irradiância solar sobre a termorregulação animal.

Finch (1976) investigou o balanço de calor em bovinos da raça Boran (*Bos indicus*) sem acesso à sombra, avaliados das 9 às 15h, expostos a níveis de irradiância solar de 446 a 823  $W m^{-2}$  e temperatura do ar de 21 a 31 °C. A pesquisa revelou que os animais absorviam até 61% da radiação de ondas curtas incidente na

superfície do pelame, totalizando  $250 \text{ W m}^{-2}$  de energia térmica por radiação de ondas curtas, dos quais  $150 \text{ W m}^{-2}$  era radiação solar direta,  $27 \text{ W m}^{-2}$  radiação difusa e  $72 \text{ W m}^{-2}$  refletida pelo solo. A produção média de calor metabólico observada foi de  $71 \text{ W m}^{-2}$ , indicando que a radiação de ondas curtas absorvida representou 71% da carga térmica dos animais, com o restante proveniente do calor metabólico. Já Da Silva et al. (2010) quantificaram o balanço de radiação em vacas da raça Holandesa mantidas em pastagens sem acesso à sombra, expostas a níveis de irradiância solar de 200 a  $1200 \text{ W m}^{-2}$ . Em média, as vacas absorveram um total de  $297 \text{ W m}^{-2}$ , sendo  $193 \text{ W m}^{-2}$  radiação solar direta,  $65 \text{ W m}^{-2}$  difusa e  $39 \text{ W m}^{-2}$  refletida. Considerando uma produção média de calor metabólico de  $250 \text{ W m}^{-2}$  para esses animais, a energia térmica ganha por radiação de ondas curtas representou 66% da carga de calor.

Em outro estudo, Maia et al. (2015) quantificaram o equilíbrio térmico de cabras de pelagem preta e branca expostas ao sol e mantidas na sombra. Observou-se que, sob níveis de irradiância superiores à  $800 \text{ W m}^{-2}$ , as cabras pretas absorveram  $400 \text{ W m}^{-2}$  e as brancas,  $200 \text{ W m}^{-2}$ . Por outro lado, quando foram mantidas na sombra, o ganho de energia térmica por radiação de ondas curtas reduziu para 58 e  $26 \text{ W m}^{-2}$ , nas cabras de pelagem preta e branca, respectivamente. O ganho de calor por radiação de ondas curtas representou 85% e 75% da carga térmica total para caprinos pretos e brancos, respectivamente.

Com relação ao comportamento de uso de sombra, ao investigar o nível de irradiância solar tolerado voluntariamente por vacas em ambiente tropical, Oliveira et al. (2014) verificaram que ao atingir níveis entre 500 e  $700 \text{ W m}^{-2}$ , as vacas aumentaram o tempo gasto na sombra de 3% para 69%; e com os níveis acima de  $700 \text{ W m}^{-2}$  o tempo gasto na sombra subiu para 95%. De maneira similar, ao estudar o comportamento de uso de sombra de bovinos de corte confinados, Maia et al. (2023) observaram que, ao alcançar níveis de irradiância de  $500 \text{ W m}^{-2}$ , a probabilidade de uso de sombra era de 70%. Esses achados destacam que os bovinos buscam sombra para se proteger do ganho de calor por radiação de ondas curtas, quando disponível.

## **2.6 Considerações finais**

A presente revisão de literatura abordou alguns dos principais pontos relacionados a interação entre bovinos de corte confinados, seu ambiente térmico e práticas de manejo, elucidando alguns fatores que tornam esses animais mais vulneráveis ao estresse térmico, quando comparados com outras categorias.

Essas pesquisas evidenciam a significativa influência do ganho de calor por radiação de ondas curtas, que, no entanto, é frequentemente negligenciada. Surge então a questão: como um bovino confinado, sem acesso à sombra e exposto a altos níveis de irradiância solar e elevadas temperaturas do ar, enquanto recebe uma dieta de alta energia para maximizar a performance, gerencia seu equilíbrio térmico e suas respostas fisiológicas para manter a homeotermia e eficiência energética nessas condições?

## **2.7 Objetivos**

Estudar o impacto da irradiância solar no balanço de calor de bovinos de corte cruzados (Nelore x Angus).

### 3 REFERÊNCIAS

- American Meteorological Society (AMS) 1989. Glossary of meteorology. American Meteorological Society, Boston, MA.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNE (ABIEC), Beef Report, Perfil da Pecuária no Brasil (2023) Disponível em: Beef Report 2023 – ABIEC Acesso em 11 de março 2024.
- Barajas, R., Garces, P., & Zinn, R. A. (2013). Interactions of shade and feeding management on feedlot performance of crossbred steers during seasonal periods of high ambient temperature. *The Professional Animal Scientist*, 29(6), 645-651.
- Beatty, D. T., Barnes, A., Taylor, E., Pethick, D., McCarthy, M., & Maloney, S. K. (2006). Physiological responses of *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle to prolonged, continuous heat and humidity. *Journal of animal science*, 84(4), 972-985.
- Beatty, D. T., Barnes, A., Taylor, E., Pethick, D., McCarthy, M., & Maloney, S. K. (2006). Physiological responses of *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle to prolonged, continuous heat and humidity. *Journal of animal science*, 84(4), 972-985.
- Berman, A. (2011). Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates?. *Journal of dairy science*, 94(5), 2147-2158.
- Berman, A., & Horovitz, T. (2012). Radiant heat loss, an unexploited path for heat stress reduction in shaded cattle. *Journal of dairy science*, 95(6), 3021-3031.
- Brown-Brandl, T. M., & Jones, D. D. (2011). Feedlot cattle susceptibility to heat stress: an animal-specific model. *Transactions of the ASABE*, 54(2), 583-598.
- Brown-Brandl, T. M., Eigenberg, R. A., Hahn, G. L., Nienaber, J. A., Mader, T. L., Spiers, D. E., & Parkhurst, A. M. (2005). Analyses of thermoregulatory responses of feeder cattle exposed to simulated heat waves. *International Journal of Biometeorology*, 49, 285-296.
- Brown-Brandl, TM, Eigenberg, RA, & Nienaber, JA (2013). Benefícios de fornecer sombra para gado confinado de diferentes raças. *Transações do ASABE*, 56 (4), 1563-1570.
- Camerro, L. Z., Maia, A. S. C., Neto, M. C., de Melo Costa, C. C., & Castro, P. A. (2016). Thermal equilibrium responses in Guzerat cattle raised under tropical conditions. *Journal of Thermal Biology*, 60, 213-221.
- Carvalho, M. E., Gasparin, G., Poleti, M. D., Rosa, A. F., Balieiro, J. C. C., Labate, C. A., ... & Coutinho, L. L. (2014). Heat shock and structural proteins associated with meat tenderness in Nellore beef cattle, a *Bos indicus* breed. *Meat science*, 96(3), 1318-1324.
- Castro, P. A., Maia, A. S. C., Fonsêca, V. D. F. C., Moura, G. A. B., de Melo Costa, C. C., Nascimento, S. T., ... & da Silva, R. G. (2021). Comparative methods analysis on rates of cutaneous evaporative water loss (CEWL) in cattle. *Journal of Thermal Biology*, 97, 102879.

- Çengel, Y. A. *Transferência de calor e massa: uma abordagem prática*. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.
- Chizzotti, M. L., Tedeschi, L. O., & Valadares Filho, S. C. (2008). A meta-analysis of energy and protein requirements for maintenance and growth of Nellore cattle. *Journal of Animal Science*, 86(7), 1588-1597.
- Cota, O., de Figueiredo, D. M., Branco, R. H., Magnani, E., Do Nascimento, C. F., de Oliveira, L. F., & Mercadante, M. E. Z. (2014). Methane emission by Nellore cattle subjected to different nutritional plans. *Tropical Animal Health and Production*, 46, 1229-1234.
- Crossland, W. L., Norris, A. B., Tedeschi, L. O., & Callaway, T. R. (2018). Effects of active dry yeast on ruminal pH characteristics and energy partitioning of finishing steers under thermoneutral or heat-stressed environment. *Journal of animal science*, 96(7), 2861-2876.
- Da Silva, G. R., LaScala, N., Lima Filho, A., & Catharin, M. (2002). Respiratory heat loss in the sheep: a comprehensive model. *International Journal of Biometeorology*, 46, 136-140.
- Da Silva, R. G., & Maia, A. S. C. (2013). *Principles of animal biometeorology (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- Da Silva, R. G., Guilhermino, M. M., & de Moraes, D. A. E. F. (2010). Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture. *International journal of biometeorology*, 54(1), 5-11.
- Da Silva, R. G., La Scala Jr, N., & Tonhati, H. (2003). Radiative properties of the skin and haircoat of cattle and other animals. *Transactions of the ASAE*, 46(3), 913.
- Dallantonia, E. E., da Rocha Fernandes, M. H. M., da Silva Cardoso, A., Leite, R. G., Ferrari, A., Ongaratto, F., ... & Reis, R. A. (2021). Performance and greenhouse gas emission of Nellore and F1 Angus× Nellore yearling bulls in tropical production systems during backgrounding and finishing. *Livestock Science*, 251, 104646.
- Ferrell, C. L., & Jenkins, T. G. (1998). Body composition and energy utilization by steers of diverse genotypes fed a high-concentrate diet during the finishing period: II. Angus, Boran, Brahman, Hereford, and Tuli sires. *Journal of animal science*, 76(2), 647-657.
- Finch, V. A. (1976). An assessment of the energy budget of Boran cattle.
- Finch, V. A. (1986). Body temperature in beef cattle: its control and relevance to production in the tropics. *Journal of Animal Science*, 62(2), 531-542.
- Finch, V. A., Bennett, I. L., & Holmes, C. R. (1984). Coat colour in cattle: effect on thermal balance, behaviour and growth, and relationship with coat type. *The Journal of Agricultural Science*, 102(1), 141-147.
- Fonsêca, V. D. F. C., Gomes da Silva, R., Moura, G. A., Snelling, E. P., Fuller, A., Mitchell, D., ... & Maia, A. S. (2022). Reliability of methods to determine cutaneous evaporative water loss rate in furred and fleeced mammals. *Journal*

- of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology, 337(4), 356-365.
- Gaughan, J. B., Mader, T. L., Holt, S. M., Josey, M. J., & Rowan, K. J. (1999). Heat tolerance of Boran and Tuli crossbred steers. *Journal of animal science*, 77(9), 2398-2405.
- Gebremedhin, K. G., & Wu, B. (2001). A model of evaporative cooling of wet skin surface and fur layer. *Journal of Thermal Biology*, 26(6), 537-545.
- Gebremedhin, K. G., Fonseca, V. D., & Maia, A. S. (2023). Methods, Thermodynamic Applications, and Habitat Implications of Physical and Spectral Properties of Hair and Haircoats in Cattle. *Animals*, 13(19), 3087.
- Grooms, D. L., & Kroll, L. A. K. (2015). Indoor confined feedlots. *Veterinary Clinics: Food Animal Practice*, 31(2), 295-304.
- Hahn, G. L. (1999). Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *Journal of animal science*, 77(suppl\_2), 10-20.
- Hansen, P. J. (2004). Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal reproduction science*, 82, 349-360.
- Herrero, M., Thornton, P. K., Notenbaert, A. M., Wood, S., Msangi, S., Freeman, H. A., ... & Rosegrant, M. (2010). Smart investments in sustainable food production: revisiting mixed crop-livestock systems. *Science*, 327(5967), 822-825.
- Hungerford, L. L., Buhman, M. J., Dewell, R. D., Mader, T. L., Griffin, D. D., Smith, D. R., & Nienaber, J. A. (2000). Investigation of heat stress mortality in four midwest feedlots.
- INCROPERA, F.P.; DeWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. John Wiley & Sons, Inc., 6ed., 2012, 697p.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Disponível em < <https://portal.inmet.gov.br/> >. Acesso em 11 de março 2024.
- Jank, L., Barrios, S. C., do Valle, C. B., Simeão, R. M., & Alves, G. F. (2014). The value of improved pastures to Brazilian beef production. *Crop and Pasture Science*, 65(11), 1132-1137.
- Maia, A. S. C., da Silva, R. G., Nascimento, S. T., Nascimento, C. C. N., Pedroza, H. P., & Domingos, H. G. T. (2015). Thermoregulatory responses of goats in hot environments. *International journal of biometeorology*, 59, 1025-1033.
- Maia, A. S. C., DaSilva, R. G., & Battiston Loureiro, C. M. (2005). Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. *International Journal of Biometeorology*, 50, 17-22.
- Maia, A. S., Gebremedhin, K. G., Nascimento, S. T., Carvalho, M. D., Simão, B. R., Camerrio, L. Z., & Neto, M. C. (2014). Development of facial masks for indirect calorimetric studies for livestock. In 2014 Montreal, Quebec Canada July 13–July 16, 2014 (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

- Maia, A. S., Moura, G. A., Fonsêca, V. F., Gebremedhin, K. G., Milan, H. M., Chiquitelli Neto, M., ... & Pacheco, R. D. L. (2023). Economically sustainable shade design for feedlot cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1110671.
- Mathewos, M., Demissie, T., Fesseha, H., & Yirgalem, M. (2020). Histological, cytological characteristics and treatment options on common skin tumors of domestic animals: A review. *Int J Recent Biotechnol*, 8(1), 1-24.
- Myers V. Thousands of Cattle Reported Dead (2022). Disponível em < <https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/news/article/2022/06/14/heat-stress-kills-estimated-10-000> >. Acesso em 11 de março 2024.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (NASEM; 2016). Nutrient requirements of beef cattle.
- OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. Disponível em < <https://www.agri-outlook.org/> >. Acesso em 11 de março 2024.
- Oliveira, S. E. O., Costa, C. C. D. M., de Souza, J. B. F., de Queiroz, J. P. A. F., Maia, A. S. C., & Costa, L. L. D. M. (2014). Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating Holstein cows in an equatorial semi-arid environment. *Tropical animal health and production*, 46, 1413-1417.
- Reis, R. A., da Silva Cardoso, A., Delevatti, L. M., Gonçalves, R., Leite, D. S., & Ruggieri, A. C. Eficiência na produção de bovinos e o impacto ambiental da atividade pecuária. IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PRODUÇÃO DE RUMINANTES NO CERRADO, 7.
- Revell, B. J. (2015). One man's meat... 2050? ruminations on future meat demand in the context of global warming. *Journal of agricultural economics*, 66(3), 573-614.
- Rodrigues, R. T. D. S., Chizzotti, M. L., Vital, C. E., Baracat-Pereira, M. C., Barros, E., Busato, K. C., ... & Martins, T. D. S. (2017). Differences in beef quality between Angus (*Bos taurus taurus*) and Nellore (*Bos taurus indicus*) cattle through a proteomic and phosphoproteomic approach. *PloS one*, 12(1), e0170294.
- Samuelson, K. L., Hubbert, M. E., Galyean, M. L., & Löest, C. A. (2016). Nutritional recommendations of feedlot consulting nutritionists: the 2015 New Mexico State and Texas Tech University survey. *Journal of Animal Science*, 94(6), 2648-2663.
- Sartori, R., Bastos, M. R., Baruselli, P. S., Gimenes, L. U., Ereno, R. L., & Barros, C. M. (2011). Physiological differences and implications to reproductive management of *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle in a tropical environment. *Reprod in Domestic Ruminants*, 7, 357.
- Scharf, B., Johnson, J. S., Weaber, R. L., & Spiers, D. E. (2012). Utilizing laboratory and field studies to determine physiological responses of cattle to multiple environmental stressors. *Journal of Thermal Biology*, 37(4), 330-338.
- Silvestre, A. M., & Millen, D. D. (2021). The 2019 Brazilian survey on nutritional practices provided by feedlot cattle consulting nutritionists. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 50, e20200189.

- Simroth, J. C., Thomson, D. U., Schwandt, E. F., Bartle, S. J., Larson, C. K., & Reinhardt, C. D. (2017). A survey to describe current cattle feedlot facilities in the High Plains region of the United States. *The Professional Animal Scientist*, 33(1), 37-53.
- Soares, L. O., Nogueira, C. H., Jayme, C. G., & Almeida, P. F. S. (2022). Financial efficiency in the confinement system for beef cattle. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 74, 913-918.
- St-Pierre, N. R., Cobanov, B., & Schnitkey, G. (2003). Economic losses from heat stress by US livestock industries. *Journal of dairy science*, 86, E52-E77.
- Turner, J. W. (1980). Genetic and biological aspects of Zebu adaptability. *Journal of Animal Science*, 50(6), 1201-1205.
- United States Department of Agriculture Foreign Agricultural Service (USDA, 2024), *Livestock and Poultry: World Markets and Trade*.
- Van Dijk, M., Morley, T., Rau, M. L., & Saghai, Y. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. *Nature Food*, 2(7), 494-501.

#### 4 CAPÍTULO 2 – IMPACT OF SOLAR IRRADIANCE ON HEAT BALANCE AND AUTONOMIC RESPONSES OF BLACK-HAIRED CROSSBREED NELLORE × ANGUS CATTLE

\* em acordo com as normas da revista para tramitação.

##### **Lay summary**

Heat stress can negatively affect the performance, welfare, and sustainability of beef cattle production systems. Characteristics such as the lack of available shade and black-haired coats are factors that increase cattle susceptibility to thermal stress. The objective of this study was to investigate the impact of solar irradiance exposure on the thermal balance and physiological responses of crossbreed (Nelore x Angus) cattle with black coats. The results showed that cattle kept exposed to solar radiation can absorb up to  $599 \text{ W m}^{-2}$  of thermal energy from shortwave radiation when solar irradiance exceeds  $900 \text{ W m}^{-2}$ , while those kept in the shaded absorb only 12% of that amount. To dissipate the excess heat absorbed on their surface, animals exposed to solar irradiance increase evaporative heat loss through respiration and cutaneous by 70%, which represents an increased water demand of approximately 7.5 L for evaporative losses compared to animals kept in the shade. However, these adjustments were not sufficient to dissipate all the excess heat absorbed, and the animals exposed to irradiance stored heat in their tissues.

##### **Teaser Text**

Providing shade to black-haired crossbreed cattle (Nelore × Angus) reduces solar heat absorption by 78% and cuts water demand for evaporative cooling by 70%, highlighting a crucial strategy for enhancing animal welfare and sustainability in beef production.

**Abstract:** The crossing between *Bos indicus* Nellore and *Bos taurus* Angus cattle have been employed by beef producers in Brazil to enhance animal performance and heat tolerance. This cross derives a black-short-haired and a high producing metabolic heat phenotype, a combination that may still challenge cattle thermoregulation in hot-sunny regions, especially those kept unprotected against solar radiation. In this study, we measured the heat balance and autonomic responses of 12 Crossbreed male cattle (Nellore x Angus) kept exposed to solar radiation (n = 6; average weight  $564.94 \pm 41.17$  kg) and shaded (n = 6; average weight  $553.64 \pm 38.04$ ). They were evaluated in 24-hour periods from December 2020 to January 2021. The physiological responses were measured using a flow respirometry system with a non-ventilated face mask incorporated into a spirometer, and temperature and water vapor pressure sensors. The meteorological variables were recorded continuously. When solar irradiance were above  $900 \text{ W m}^{-2}$ , sun exposed cattle absorbed up to  $599 \text{ W m}^{-2}$  by short-wave solar radiation, while those shaded  $127 \text{ W m}^{-2}$ . Under such circumstances, the former had higher hair-coat temperature ( $42.5$  vs.  $35$  °C), which in turn, results on higher rates of heat transference to the environment through long-wave radiation ( $66.5$  vs.  $-4 \text{ W m}^{-2}$ ) and surface convection ( $66$  vs.  $37 \text{ W m}^{-2}$ ). Sun exposed cattle increased demand for respiratory ( $19$  vs.  $5 \text{ W m}^{-2}$  or  $190$  vs.  $56 \text{ g animal}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) and cutaneous ( $140$  vs.  $53 \text{ W m}^{-2}$  or  $1460$  vs.  $555 \text{ g animal}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ) evaporative water loss. Even so, they had greater oscillation of rectal temperature throughout the day ( $0.84$  vs.  $0.23$  °C) against those shaded. In conclusion, the sun exposed black-haired crossbred cattle (Nellore × Angus) can absorb up to 78 % more thermal radiation than those in shade. Although they were able to keep homeothermy, sun exposed cattle are likely to require up to  $7.5 \text{ kg day}^{-1}$  more water than if they were in shade in order to sustain increments on (70%) cutaneous and respiratory evaporative water loss.

**Keywords:** beef cattle, thermal balance, shade, radiation absorbed, latent heat loss.

#### 4.1 Introduction

Cattle experience thermal stress when the heat produced by metabolism and that absorbed from the surrounding environment is higher than heat loss, leading heat being stored in body tissues. Heat stress has been widely described as impairing animal performance, health, welfare, and consequently, the profitability of livestock operations (Hahn, 1997; St-Pierre et al., 2003; Moura et al., 2020). However, its magnitude depends on the intensity and duration of the heat stress event, along with other risk factors related to management and animal heat tolerance traits (Mader et al., 2006; Berman, 2011; Brown-Brandl et al., 2011). For example, in regions with high levels of solar radiation, cattle in open feedlots or pasture systems without shading are more susceptible to heat stress (Sullivan et al., 2011; Maia et al., 2023), particularly those with high metabolic heat production such as *Bos taurus* breeds and their crossbreeds (Hansen, 2007; Moura et al., 2021), with dark-haired (Gebremedhin et al., 2023), and fed high-energy diets. Ultimately, advances in climate change are expected to exacerbate the problem of heat stress in these areas, mostly as a consequence of the increasing frequency and intensity of heat waves (Mitchell et al., 2018; NASA, 2024).

In hot, sunny regions, solar irradiance is the most important meteorological factor affecting the heat balance of cattle kept in open field conditions, such as in pens in feedlot operations and paddocks of pasture systems. However, research on the effects of exposure to solar irradiance on thermal balance of cattle is limited (Bond et al., 1967; Finch et al., 1984; DaSilva et al., 2010). In their study on Holstein cows with black and light coats on pasture, DaSilva et al. (2010) found that the cows absorbed up to  $300 \text{ W m}^{-2}$  of short-wave radiation under irradiance levels exceeding  $1000 \text{ W m}^{-2}$ . This amount of heat can account for more than 50% of the total heat load (Finch et al., 1976; DaSilva et al., 2010; Moura et al., 2021). As a consequence, cattle depend exclusively on evaporative cooling mechanisms, thereby increasing animal and environmental costs in terms of water use (Maia et al., 2023). Given the importance of thermal radiation, an accurate evaluation and/or prediction on how meteorological variables would impact cattle thermal balance should take into account the contribution of the thermal radiant environment, an aspect rarely addressed in previous studies (DeMelo et al., 2018ab; Nascimento et al., 2019; Rahimi et al., 2020).

Currently, in Brazil, close to seven million cattle are finished in open feedlots (ABIEC, 2023), and most are kept without access to shade. Nelore (*Bos indicus*) cattle are the most common breed used for beef in Brazil and are well-known for their heat tolerant (De Melo Costa et al., 2018). However, beef producers have increasingly the use of the semen of Black Angus (*Bos taurus*) cattle over the last 20 years (ASBIA, 2020) to inseminate Nelore cows, as a strategy to produce crossbred cattle that are more productive but still heat tolerant. Moura et al. (2021) observed that although this genotype produced more metabolic heat, its thermal response was similar to that of pure Nelore cattle, when protected from short-wave solar radiation. Nonetheless, when investigating the impact of shading on the performance of this crossbred, Maia et al. (2023) reported that the availability of shading increased the carcass weight by eight kilograms, as well as decreased water intake by 3.5 kg per day, in very hot days.

In commercial feedlots conditions, we hypothesize the crossbreed (Nelore x Angus) black-haired exposed to the sun absorb more energy by short-wave radiation on the surface than those kept shaded, which will be added to the metabolic heat. To dissipate the excess heat, those animals need to recruit more mechanisms for evaporation losses and will have greater water use. To test this hypothesis, this study aimed to determine the impact of exposition to solar radiation on thermal equilibrium and autonomic responses of a black-haired F<sub>1</sub> *Bos indicus* Nelore × *Bos taurus* Angus cattle. Specifically, sun exposed and shaded cattle were measured using a flow-through respirometry and a system for thermal status evaluation to determine heat balance; and its impact on breathing patterns and body temperatures, in addition to requirements for evaporative water loss through respiratory and cutaneous surface.

## 4.2 Material and methods

### 4.2.1 Animals and experimental design

All animal procedures were approved by the Ethics Committee for the Animal Use of the São Paulo State University, Jaboticabal, São Paulo, Brazil (Protocol number 0096062/19). The study was conducted at the Animal Biometeorology Laboratory of the São Paulo State University, São Paulo, Brazil (21° 08 'S, 48° 11' W, 583 m altitude). From December 2019 to January 2020, twelve uncastrated crossbred cattle (Nelore ×

Angus), approximately with 20 months of age, were randomly assigned into two groups: 1) cattle kept exclusively exposed to sun ( $n = 6$ ; body weight =  $553.64 \pm 38.00$  kg); and 2) cattle kept exclusively shaded ( $n = 6$ ; body weight =  $564.95 \pm 41$  kg). The animals were housed in individual pens of  $14 \text{ m}^2$  ( $2.8 \times 5 \text{ m}$ , width  $\times$  length), with a water trough and a feeder with  $0.90 \text{ m}$  of feeding space. Water was freely available. The shaded pens were roof-coated (55% aluminum, 43.5% zinc, and 1.5% silicon), while the sun-exposed pens had no roof. Cattle were given a total mixed ration (TMR) diet at 7:30 and 16:30, formulated to meet or exceed  $1.5 \text{ kg}$  of average daily gain in the finishing phase (LRNS, 2022). The TMR consisted of 19.21 % of corn silage, 63.74 % of ground corn, 3.51 % of cottonseed meal, 10.03 % of soybean, and 3.51 % of premix, on a dry matter basis.

The sun-exposed and shaded cattle were monitored over 24-hour periods using flow-through respirometry with a non-ventilated face mask to measure heat balance and autonomic responses (Maia et al., 2016; Moura et al., 2021). Each group was assigned in a 6x6 Latin Square design six animals assessed every six hours over six consecutive days, replicated four times within 24 hours (1st Latin square: 06:00 to 12:00; 2nd: 12:00 to 18:00; 3rd: 18:00 to 00:00; 4th: 00:00 to 06:00). The sun-exposed cattle were evaluated from December 19 to 25, 2020, and the shaded cattle from January 5 to 11, 2022.

Before starting the data collection, cattle underwent for  $\sim 90$  days of training in order to reduce fear responses to human presence, restraint, and wearing face mask (Camerro et al., 2016; Fonsêca et al., 2019; Brelaz et al., 2024 [Manuscript submitted for publication]). During the data collection, animals were calmly carried out to the squeeze chute, which was placed few meters ( $\sim 5 \text{ m}$ ) away from the individual pens. Each animal remained restrained close to 40 minutes for taking measurements. The sun exposed cattle were evaluated fully exposed to direct sunlight, while for shaded cattle a provisory 100% solar-blockage roof was installed.

#### 4.2.2 *Meteorological variables*

The meteorological variables including solar irradiance (wave-length between  $0.3$  and  $3.6 \mu\text{m}$ ), ultraviolet solar radiation (wave-length between  $0.280$  and  $0.400 \mu\text{m}$ ), longwave radiation (wave-length between  $4.5$  and  $42 \mu\text{m}$ ), air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ),

relative humidity (%), wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ ) and direction (degrees), precipitation ( $\text{mm hour}^{-1}$ ) and black globe temperature in the sun ( $^{\circ}\text{C}$ ) and in the shade ( $^{\circ}\text{C}$ ) were measured at one-minute intervals throughout the experimental period using a weather station (Campbell Scientific®) installed near ( $\sim 2\text{m}$ ) to the individual pens. The mean radiant temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) was calculated according to DaSilva and Maia 2013. The Heat Load Index (HLI) was calculated according to Gaughan et al. (2008) to summarize weather and thermal conditions.

#### 4.2.3 *Autonomic responses and thermal equilibrium*

The physiological responses measured using a flow-through respirometry system with a non-ventilated face mask, incorporated into a spirometer, temperature and water vapor pressure sensors were: respiratory rate ( $\text{breaths min}^{-1}$ ), ventilation rate ( $\text{L s}^{-1}$ ), tidal volume ( $\text{L resp}^{-1}$ ); fractions of oxygen (%), carbon dioxide (%), and methane (%) in the exhaled air; the saturation pressure of the exhaled air (kPa), the water vapor saturation pressure at the skin temperature (kPa) and the temperatures of the exhaled air ( $^{\circ}\text{C}$ ), hair-coat ( $^{\circ}\text{C}$ ), skin ( $^{\circ}\text{C}$ ) and rectum ( $^{\circ}\text{C}$ ). Details of the sensor's operation, resolution, and accuracy were previously described elsewhere (Maia et al., 2016).

The rate of metabolic heat production and heat fluxes by convection, long-wave radiation, and respiratory evaporation were calculated according to DaSilva and Maia (2013). All fluxes were given in energy per unit surface area ( $\text{W m}^{-2}$ ), which in turn, was determined using the equation proposed by Simão et al. (2017). In order to quantify the heat absorbed through short-wave solar radiation at the body surface, a shape factor ( $F_C$ ) was obtained according to DaSilva et al. (2010). The  $F_C$  represents the net surface area illuminated by the solar beam. The best geometric model for quadruped animals is a horizontal cylinder with semi-spherical extremities (Monteith and Unsworth, 1990; Campbell and Norman, 1998; DaSilva, 2010). The  $F_C$  was then obtained according to the equation:

$$F_C = \frac{2hr[1 - (\cos^2\beta)(\cos^2\varpi)]^{0.5} + \pi r^2}{2\pi r(h + 2r)\sin\beta}$$

where  $h$  is the length of the animal (m),  $r$  is the radius (m),  $\beta$  is the angle of elevation of the sun (degrees), and  $\varpi$  is the azimuthal angle of the animal (degrees), assumed to be 23 (degrees). The heat gained due to short-wave radiation ( $q''_{RC}$ ,  $W\ m^{-2}$ ) was then obtained using the equation:

$$q''_{RC} = (F_c \alpha_p R_s) + (0,5 \alpha_p R_s \rho_s)$$

where  $q''_{RC}$  is the total amount of heat absorbed due to short-wave radiation,  $\alpha_p$  is the absorptance coefficient of the hair-coat, assumed to be 0.93 for a black hair coat (Gebremedhin et al., 2023); and  $\rho_s$  is the reflectance coefficient of the ground surface, assumed to be 0.26 (DaSilva et al., 2010); and  $R_s$  is the direct and diffuse short-wave solar radiation ( $W\ m^{-2}$ ).

The heat flow by cutaneous evaporation was quantified using a flow-through ventilated capsule (Maia et al., 2005), by placing an aluminum capsule (10 cm diameter  $\times$  4 cm height) on the cutaneous surface, held in place by a elastic belt. The capsule was placed 20 cm below the dorsal line, thoracic region, between the third and fourth ribs, which was connected to a water vapor analyzer (RH-300, Sable System, USA) and a pump (SS4, Sable System, USA). The flow rate passing throughout the capsule was set at  $3.5 \times 10^{-5}\ m^3\ s^{-1}$ . The total heat transferred by skin evaporation ( $q''_{es}$ ,  $W\ m^{-2}$ ) was obtained based on the equation:

$$q''_{es} = \lambda \left[ \frac{F (\Psi_{EP} - \Psi_{ATM})}{A_{cap}} \right]$$

where  $\lambda$  is the latent heat ( $J\ g^{-1}$ );  $F$  is the flow rate ( $m^3\ s^{-1}$ );  $\Psi_{EP}$  is the absolute humidity at the skin surface ( $g\ m^{-3}$ );  $\Psi_{ATM}$  is the absolute humidity of the atmosphere ( $g\ m^{-3}$ );  $A_{cap}$  is the area of the capsule ( $m^2$ ). To quantify the amount of water ( $g\ h^{-1}$ ) used for heat flow by cutaneous and respiratory evaporation, the latent heat was removed from the equations to calculate the losses of heat ( $\lambda$ ).

#### 4.2.4 Statistical analysis

Statistical analyses were carried out using the Statistical Analysis System (SAS) according to Littell et al. (2006), using least squares method from GLM package:

$$Y_{ijklm} = \mu + \rho_i + A_j(\rho_i) + D_k(\rho_i * RL) + \rho_i * RL + e_{ijklm}$$

where  $Y_{ijklm}$  is the  $m$ -th observation of the variables studied;  $\mu$  is the parametric mean;  $\rho_i$  is the fixed effect of the  $i$ -th treatment ( $i$  = exposed to sun or shaded);  $A_j(\rho_i)$  is the random effect of the  $j$ -th animal ( $j = 1, \dots, 6$ ) within treatment  $i$  ( $i$  = sun exposed or shaded), if  $i$  = sun exposed,  $j = 1, \dots, 6$  if  $i$  = shaded,  $j = 7, \dots, 12$ ;  $D_k(\rho_i * RL)$  is the random effect of the  $k$ -th evaluation day ( $k = 1, 2, \dots, 12$ ) within the interaction of the  $i$ -th treatment ( $i$  = sun exposed or shaded) with the  $l$ -th radiation class (1 = morning and  $R_s$  of 0 - 300  $W m^{-2}$ ; 2 = morning and  $R_s$  of 300 - 500  $W m^{-2}$ ; 3 = morning and  $R_s$  of 500 - 700  $W m^{-2}$ ; 4 = morning and  $R_s$  of 700 - 900  $W m^{-2}$ ; 5 = morning and  $R_s > 900 W m^{-2}$ ; 6 = morning and  $R_s > 900 W m^{-2}$ ; 7 = afternoon and  $R_s$  of 900 - 700  $W m^{-2}$ ; 8 = afternoon and  $R_s$  of 700 - 500  $W m^{-2}$ ; 9 = afternoon and  $R_s$  of 500 - 300  $W m^{-2}$ ; 10 = afternoon and  $R_s$  of 300 - 0  $W m^{-2}$ );  $\rho_i * RL$  is the fixed effect of the interaction between the  $i$ -th treatment ( $i$  = sun or shade) and the  $l$ -th radiation class (1 = morning and  $R_s$  of 0 - 300  $W m^{-2}$ ; 2 = morning and  $R_s$  of 300 - 500  $W m^{-2}$ ; 3 = morning and  $R_s$  of 500 - 700  $W m^{-2}$ ; 4 = morning and  $R_s$  of 700 - 900  $W m^{-2}$ ; 5 = morning and  $R_s > 900 W m^{-2}$ ; 6 = morning and  $R_s > 900 W m^{-2}$ ; 7 = afternoon and  $R_s$  of 900 - 700  $W m^{-2}$ ; 8 = afternoon and  $R_s$  of 700 - 500  $W m^{-2}$ ; 9 = afternoon and  $R_s$  of 500 - 300  $W m^{-2}$ ; 10 = afternoon and  $R_s$  of 300 - 0  $W m^{-2}$ );  $e_{ijklm}$  is the random error.

##### 4.2.4.1 Modeling with generalized additive models

In addition, to model the impact of irradiance solar and air temperature and your relationships with hair-coat temperature, respiratory rate, and total losses water by evaporation were used generalized additive models (GAM; Lin and Zang, 1999), assumed errors to be normally distributed and with an identity link function. Analyses were performed in R (R Core Team, 2024) using the *mgcv* package (Wood, 2011). The model includes the fixed effect of treatment and its interaction with air temperature and solar irradiance. To discuss the results in greater depth, partial dependency graphs were presented illustrating the relationship between air temperature, keeping solar irradiance constant at 500  $W m^{-2}$  (Figures 8A, 9A, 10A), and solar irradiance, keeping

air temperature constant at 27°C (Figures 8B, 9B, 10B). These graphs allow us to visualize how each of these variables impacts the physiological responses of cattle in isolation, providing insights into the critical limits at which these variables begin to exert a more pronounced effect on the observed responses, such as hair-coat surface temperature, respiratory rate and water loss through evaporation.

### 4.3 Results

**Table 1. Meteorological variables throughout the trials (mean, minimum, and maximum)**

	Shaded			Sun exposed		
	Med	Min	Max	Med	Min	Max
<b>Solar irradiance, W m<sup>-2</sup></b>	337	0	1278	624	0	1304
<b>Ultraviolet radiation, W m<sup>-2</sup></b>	18	0	61	28	0	56
<b>Air temperature, °C</b>	24	18	31	28	17	35
<b>Relative humidity, %</b>	86	57	100	64	34	100
<b>Black-globe temperature (sun), °C</b>	31	18	48	36	14	49
<b>Wind speed, m s<sup>-1</sup></b>	0.7	0	4	1	0	4
<b>Heat load index</b>	86	62	114	87	56	105

The sun-exposed cattle were exposed to solar irradiance levels above 1200 W m<sup>-2</sup>, mean air temperature of 28 °C, and mean relative humidity of 64%. Cattle shaded were exposed to mean levels of 24 °C for air temperature and 86% for and mean relative humidity (Table 1). And both conditions showed similar values mean heat load index, 86 for shaded and 87 for sun-exposed.

The sun-exposed cattle had greater metabolic rate ( $P < 0.01$ ) than those shaded, on average 202 W m<sup>-2</sup> vs. 184 W m<sup>-2</sup>. When solar irradiance exceeded 900 W m<sup>-2</sup>, sun-exposed cattle absorbed up to 599 W m<sup>-2</sup> of heat due to short-wave radiation, while those shaded absorbed 127 W m<sup>-2</sup>. The hair-coat surface temperature of the sun-exposed cattle was up to 8.5 °C greater than those shaded, thereby resulting greater ( $P < 0.01$ ) thermal gradient between hair-coat temperature and air temperature (8 vs. 12 °C), in addition to hair-coat temperature and mean radiant temperature (-0.6 vs. 10 °C). As a result, the heat flow by convection (66 vs. 37 W m<sup>-2</sup>) and long-wave radiation (66 vs. - 4 W m<sup>-2</sup>) were, on average, greater ( $P < 0.01$ ) in sun-exposed cattle.

When solar irradiance levels increased from 150 to 900 W m<sup>-2</sup>, the sun-exposed cattle increased their respiratory rate from 32 to 56 breaths min.<sup>-1</sup> (▲ = 24 breaths min.<sup>-1</sup>), ventilation rate from 2.66 to 4.19 L s<sup>-1</sup> (▲ = 1.53 L s<sup>-1</sup>), exhaled air saturation pressure from 2.5 to 4 kPa (▲ = 1.5 kPa) and exhaled air temperature from 25 to 35 °C (▲ = 10 °C). Increments on ventilation and respiration rate was accompanied by a decrease in tidal volume. Such changes represented increments on respiratory evaporative heat flow from 3 to 21 W m<sup>-2</sup> (▲ = 18 W m<sup>-2</sup>). On the other hand, the respiratory rate of cattle shaded remained relatively constant, between 29 and 35 breaths min.<sup>-1</sup> (▲ = 6 breaths min.<sup>-1</sup>), ventilation rate between 2.3 and 2.6 L s<sup>-1</sup> (▲ = 0.3 L s<sup>-1</sup>), water vapor pressure at the exhaled air temperature between 2.7 and 3.5 kPa (▲ = 0.8 kPa), the exhaled air temperature between 25 and 29 °C (▲ = 4 °C), and the respiratory evaporative heat flow ranging from 1.6 to 6.5 W m<sup>-2</sup> (▲ = 4.9 W m<sup>-2</sup>).

The skin temperature of sun-exposed cattle increased from 34 to 41 °C (▲ = 7 °C), as well as water vapor saturation at the skin surface increased from 2.5 to 4.4 kPa (▲ = 1.9 kPa) as the solar irradiance levels increased. Cattle shaded however presented slight oscillations, with skin temperature ranging from 34 to 36 °C (▲ = 2 °C) and saturation pressure at the skin surface from 2.6 to 3.4 kPa (▲ = 0.8 kPa). The sun-exposed cattle had greater ( $P < 0.01$ ) heat flow by cutaneous evaporation, with an average of 113.7 W m<sup>-2</sup> (from 23 to 163 W m<sup>-2</sup>), while those shaded had an average of 44.51 W m<sup>-2</sup> (from 11 to 65 W m<sup>-2</sup>). In terms of mass transfer (cutaneous + respiratory evaporation), the sun-exposed cattle evaporated 1140 g h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup> (from 231 to 1664 g h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>), while those shaded 429 g h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup> (from 121 to 612 g h<sup>-1</sup> animal<sup>-1</sup>). Even so, the sun-exposed cattle had higher oscillation on rectal temperature ( $P < 0.01$ ), with an average of 39.42 °C against 39.16 °C for those shaded, and daily oscillation of 0.84 °C and 0.23 °C, respectively.

#### 4.3.1 Results Modeling with GAM

It can be observed that as air temperature increases, the hair-coat surface temperatures gradually rise as well (Fig 8). However, when air temperature exceeds 27°C, a more pronounced increase in hair-coat surface temperature occurs in animals kept in the sun. A similar pattern is observed for the partial effect of solar irradiance. Up to 400 W m<sup>-2</sup>, hair-coat surface temperatures show little variation and do not differ

significantly. However, when solar irradiance exceeds  $500 \text{ W m}^{-2}$ , the hair-coat surface temperature of animals kept in the sun rises sharply, while it remains practically constant for animals in the shade. The respiratory rate of animals kept in the shade increased gradually with rising air temperatures (Figure 9A). In contrast, solar irradiance had no significant effect on the respiratory rate of these animals (Figure 9B). For animals kept in the sun, the respiratory rate increased more sharply compared to those in the shade, with a more pronounced rise starting at  $26^\circ\text{C}$  and  $500 \text{ W m}^{-2}$ . Additionally, animals in the shade exhibited a more consistent respiratory rate, while those exposed to the sun showed greater variability. Water vapor loss increased with rising air temperatures in both conditions (shade and sun). However, this loss was significantly higher in animals kept in the sun, especially when air temperatures exceeded  $27^\circ\text{C}$ . Regarding solar irradiance, there was no noticeable effect on water vapor loss levels in either shade or sun conditions, although it was more pronounced in animals kept in the sun.

#### 4.4 Discussion

Our study highlights the critical impact of short-wave solar irradiance on the heat balance and autonomic responses in cattle, emphasizing the significant challenge this poses for cattle kept in feedlots or pastures without shade. When exposed to the sun, black-haired cattle may experience up to  $1000 \text{ W m}^{-2}$  of solar irradiance, leading to the absorption of  $599 \text{ W m}^{-2}$  of heat from short-wave solar radiation. Under such conditions, sensible heat losses are insufficient to dissipate the excess heat absorbed. Consequently, cattle increase heat and water transfer through panting and sweating, evaporating approximately  $190 \text{ g h}^{-1} \text{ animal}^{-1}$  of water from the upper respiratory tract and  $1460 \text{ g h}^{-1} \text{ animal}^{-1}$  of sweat from the skin surface. To replace body fluids lost through panting and sweating, cattle without shade provision are likely to require an additional 7.5 liters of water per day compared to those provided with shade. However, providing shade mitigates nearly 78% of the heat absorbed from short-wave solar radiation and reduces evaporative water loss by 68% through panting and 67% through sweating. Despite these adaptations, both cattle with and without shade provision maintained homeothermy, with the mean daily oscillation for rectal temperature in shaded cattle being  $0.23^\circ\text{C}$  ( $39.07$  to  $39.30^\circ\text{C}$ ) and in cattle without shade being  $0.84$

°C (38.96 to 39.80 °C). This temperature difference represents an additional 1,127,056 J animal<sup>-1</sup> of heat stored in the body tissues of unshaded cattle.

The heat gained from short-wave solar irradiance can be the principal source/input of heat for cattle kept in feedlots or pastures without shade. The heat absorbed depends on the level of solar irradiance that impinges on animals and the optical properties of their hair coat surface. Black-haired cattle are likely to absorb twice as much heat by short-wave radiation than light-haired cattle (Gebremedhin et al., 2023). In this study, the heat absorbed by short-wave radiation from black-haired cattle without the provision of shade increased with levels of solar irradiance. At solar irradiance levels above 900 W m<sup>-2</sup>, frequently measured in tropical areas, cattle absorbed 599 W m<sup>-2</sup> by short-wave radiation, a value almost three times greater than 202 W m<sup>-2</sup> of heat produced by metabolism. However, if we consider an animal of the Nellore breed, with a light-haired and absorptance of 0.4  $\mu\text{m}$ , the heat absorbed by short-wave radiation would be close to 280 W m<sup>-2</sup>, a rate two times lower than in black-haired cattle. This fact explains the higher susceptibility to heat stress and mortality rate of black-haired cattle kept in feedlots without provision of shade during extreme heat weather events (Hungerfor et al., 2000; Brown-Brandl et al., 2006). When provided with shade, although cattle in this study had the heat absorbed by the direct short-wave radiation abated, they still gained 127 W m<sup>-2</sup> of heat from diffuse and reflected short-wave radiation.

As a result of absorbing heat from short-wave radiation, the coat surface temperature of cattle without shade was, on overall, 4°C higher than that of shaded cattle. This increased temperature in unshaded cattle led to greater heat dissipation to the environment through surface convection and long-wave radiation. The rate of convective heat transfer is influenced by the temperature difference between the body surface and the surrounding air, while long-wave radiation heat transfer depends on the temperature difference between the body surface and the average radiant temperature (DaSilva and Maia, 2013; Mitchell et al., 2018). In this study, solar irradiance levels above 600 W m<sup>-2</sup> resulted in thermal gradients ranging from 5 to 12°C for cattle without shade and from -2 to 9°C for shaded cattle. This resulted in a maximum heat transfer of 58 and 80 W m<sup>-2</sup> through convection and long-wave radiation, respectively, for cattle without shade, and 45 and 18 W m<sup>-2</sup> for shaded cattle.

However, the highest sensible heat loss rate observed ( $\sim 140 \text{ W m}^{-2}$ ) in cattle without shade was not enough to counterbalance the heat gained from short-wave radiation ( $\sim 450 \text{ W m}^{-2}$ ) within the same range of irradiance. Similarly, unshaded black-haired goats, when subjected to high solar irradiance, exhibited higher coat surface temperatures (41 vs.  $36^\circ\text{C}$ ) and convective heat loss rates ( $125 \text{ vs. } 55 \text{ W m}^{-2}$ ) compared to shaded goats. Nevertheless, this was also insufficient to negate the heat absorbed from short-wave solar radiation ( $\sim 400 \text{ W m}^{-2}$ ) (Maia et al., 2015).

In this study, as the solar irradiance increased from  $150$  to  $900 \text{ W m}^{-2}$ , cattle without shade had more autonomic responses than those with shade to enhance the evaporative water loss through panting and sweating. Overall, they had the respiratory rate increased by 60% ( $33$  to  $55 \text{ breath min}^{-1}$ ), the ventilation rate by 40% ( $3$  to  $4.2 \text{ L s}^{-1}$ ), and the tidal volume decreased by 14 % ( $5$  to  $4.3 \text{ L breath}^{-1}$ ), with increasing irradiance, which well characterizes the respiratory pattern during panting. The panting is a controlled increase in respiratory rate accompanied by a decrease in tidal volume, with the purpose of increasing ventilation and evaporative heat loss of the upper respiratory tract, with preservation of alveolar ventilation and gas exchange rates (Beatty et al., 2006; Robertshaw, 2006). By accompanying increments of ventilation rate, cattle also increased the water vapor gradient between the respiratory tract and the atmosphere by 360% ( $0.5$  to  $2.3 \text{ kPa}$ ). As a result, they had evaporated from the upper respiratory tract  $189 \text{ g h}^{-1} \text{ animal}^{-1}$  of water, thereby resulting in  $21 \text{ W m}^{-2}$  of heat being transferred to the environment. This respiratory evaporative water loss rate can represent only 3% of metabolic heat production. Under such circumstances, the cutaneous evaporative water loss was the most important route to transfer body heat to the environment.

Cattle without shade had a cutaneous evaporative water loss requirement 70% higher than cattle with shade. As the solar irradiance increased, the sweating rate of cattle without shade ranged between  $207$  and  $1458 \text{ g h}^{-1} \text{ animal}^{-1}$ , with the associated heat transfer through the cutaneous surface ranging between  $23$  to  $163 \text{ W m}^{-2}$ . For cattle in the shade, the sweating rate ranged between  $104$  and  $556 \text{ g h}^{-1} \text{ animal}^{-1}$ , with the heat transfer through the cutaneous surface ranging between  $12$  to  $65 \text{ W m}^{-2}$ . Overall, the cutaneous evaporative water loss accounted for 55 % of the metabolic heat production for cattle unshaded, and 24 % for cattle provided with shade; however,

it represented up to 80% and 30%, respectively. Previous studies have also shown that the cutaneous evaporative water loss is the principal heat transfer route in cattle, sheep, and goats exposed to conditions with high heat load (Hillman et al., 2001; Maia et al., 2005; Moura et al., 2021; Castro et al., 2021). In addition, water losses in the form of steam can be higher, depending on thermal conditions (Figure 10A).

Because of the conflict between body fluid and thermal homeostasis, the water lost due to respiratory and cutaneous evaporation should be timeously replaced (Mitchell et al., 2018). Regarding daily water required to be replaced, cattle with shade would require 5.16 kg of water animal<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, and cattle without shade would require 12.68 kg of water animal<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>. Therefore, the black-haired Nellore x Angus cattle kept without shade in tropical regions will likely require more than 7.5 kg of water per day than if they were provided with shade. However, this requirement should vary according to the breed and the heat load experienced by cattle. For instance, such predictions are higher than the mean difference of 3.5 kg of water found between Nellore cattle kept without and with the provision of shade (Maia et al., 2023). Requirements for evaporative water loss of Nellore cattle without provision of shade are expected to be lower than the black-haired Angus, given that Nellore cattle previously demonstrated lower evaporation rates (Moura et al., 2021).

To contextualize the significance of this disparity, let us consider the average water consumption and weight gain reported by Maia et al. (2023), combined with the data from our investigation. We estimated the water intake at 37.3 and 44.8 L animal<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup>, and the weight gain at 1.657 and 1.565 kg animal<sup>-1</sup> day<sup>-1</sup> for shaded and sun-exposed animals, respectively. Calculating the water use efficiency (water intake per unit of weight gain), it is apparent that shaded animals require 22.51 L of water to gain 1 kilogram per day, whereas sun-exposed animals need 28.65 L, a 22% reduction in water use efficiency. Consequently, providing shade could potentially enhance water use efficiency in meat production, thereby improving the sustainability of production systems. However, it is pertinent to note that our study did not directly measure water intake; these figures were deduced from estimated water losses due to evaporation. Further research is imperative to corroborate these findings.

Given the current study, how does feedlot black-haired cattle manage its heat balance when no shade is available? Let us assume the average condition along the

radiation classes, shown in Fig. 7. The heat load (metabolic heat production + absorbed short-wave radiation) is up to twice as high for exposed cattle (547 vs. 256  $\text{W m}^{-2}$ ). Absorbed short-wave radiation accounts for 60% of the total heat load for exposed cattle, whereas metabolism is the predominant heat source (72%) for shaded animals. Considering sensible heat flows (convection + long-wave radiation), it is observed that exposed cattle dissipate more heat (108  $\text{W m}^{-2}$ ) than shaded cattle (52  $\text{W m}^{-2}$ ). Nonetheless, this dissipation only represents 30% of the heat absorbed from short-wave radiation for exposed cattle. In an effort to maintain thermal equilibrium, sun-exposed animals increased latent heat loss (respiratory plus cutaneous) by 158%. Despite this, the higher rates of sensible and latent heat dissipation to the environment (237 vs. 102  $\text{W m}^{-2}$ ) were insufficient to offset the thermal energy absorbed from short-wave radiation, resulting in twice the amount of heat being stored in their body tissues (310 vs. 154  $\text{W/m}^2$ ). Consequently, sun-exposed animals exhibited a greater fluctuation in rectal temperature (0.23 vs. 0.84°C), indicative of the increased accumulation of thermal energy.

In terms of energy storage, the variation in rectal temperature for animals exposed to radiation compared to those that were shaded represented 1,573,992 and 446,936 J, or 36.43 and 10.34 W, respectively. In this scenario, if a producer wishes to employ sprinklers as a means to mitigate heat stress, which would be quantity of water is required to be sprayed into the skin surface of the sun-exposed animals to dissipate the heat energy through evaporation, thereby equalizing their body temperature to that of the shaded animals? Given that the vaporization of 1 gram of water consumes 2,432.19 J, it is calculated that 648 grams of water would need to be applied to the skin surface. Taking into account that a sprinkler nozzle has a 30% efficiency rate in wetting the surface of cattle, according to Chen et al. (2015), the total volume of water required would be approximately 2.2 L. It is expected that animals subjected to sprinkling will have a lower need for water for thermolysis by evaporative mechanisms, potentially decreasing the demand for the additional 8.5 L of water intake previously mentioned. Even after accounting for the water utilized in sprinkling, there would remain an excess of approximately 6 L of water per animal.

These results (Fig 8, 9, 10) highlight the importance of considering the effects of solar irradiance, which is often not incorporated into research and indices used to

summarize thermal conditions. Exposure to solar irradiance amplifies the physiological responses of animals to air temperature, which is a compensatory response aimed at maintaining thermal balance. This behavior is more noticeable in hair-coat surface temperature and respiratory rate, as they are responses more influenced by environmental conditions and have a shorter lag time. However, this relationship is not as clear regarding solar irradiance and water vapor loss. It is interesting to note the presence of a threshold, where above 26 to 27°C, when animals are kept in the sun, there seems to be a more pronounced increase in surface temperature, respiratory rate, and water vapor loss. Regarding irradiance, this threshold appears to be between 400 and 500 W m<sup>-2</sup>.

#### 4.5 Conclusion

In this study, we demonstrated that black-haired crossbreed cattle (Nellore × Angus) kept without access to shade can absorb up to 599 W m<sup>-2</sup> on their body surface when solar irradiance exceeds 900 W m<sup>-2</sup>. As a result, these animals exhibited a 70% higher demand for water to dissipate heat through latent mechanisms, requiring up to 7.5 additional liters of water per day. Despite physiological adjustments aimed at increasing heat dissipation, sun-exposed animals stored twice as much heat (310 vs. 154 W m<sup>-2</sup>) compared to those kept in the shade, which was reflected in a greater fluctuation in rectal temperature (0.84 vs. 0.23 °C). The provision of shade effectively reduced the absorption of shortwave radiation on the body surface by 78%, minimizing the need for thermoregulatory adjustments and decreasing heat storage in the animals' tissues.

#### 4.6 References

ASBIA, Associação Brasileira de Inseminação Artificial. Index ASBIA. 2024.

Beatty, D. T., Barnes, A., Taylor, E., Pethick, D., McCarthy, M., & Maloney, S. K. (2006). Physiological responses of *Bos taurus* and *Bos indicus* cattle to prolonged, continuous heat and humidity. *Journal of animal science*, 103(4), 972-985.

Berman, A. "Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climates?." *Journal of dairy science* 94.5 (2011): 2147-2158.

- Bond, T. E., Kelly, C. F., Morrison, S. R., & Pereira, N. (1967). Solar, atmospheric, and terrestrial radiation received by shaded and unshaded animals. *Transactions of the ASAE*, 10(5), 622-0625.
- Brown-Brandl, T. M., & Jones, D. D. (2011). Feedlot cattle susceptibility to heat stress: an animal-specific model. *Transactions of the ASABE*, 54(2), 583-598.
- Brown-Brandl, T. M., Eigenberg, R. A., & Nienaber, J. A. (2006). Heat stress risk factors of feedlot heifers. *Livestock Science*, 105(1-3), 57-68.
- Camerro, L. Z., Maia, A. S. C., Neto, M. C., de Melo Costa, C. C., & Castro, P. A. (2016). Thermal equilibrium responses in Guzerat cattle raised under tropical conditions. *Journal of Thermal Biology*, 60, 213-221.
- Campbell, G. S., & Norman, J. M., (1998). The light environment of plant canopies. An introduction to environmental biophysics, 247-278.
- Castro, P. A., Maia, A. S. C., Fonsêca, V. D. F. C., Moura, G. A. B., de Melo Costa, C. C., Nascimento, S. T., ... & da DaSilva, R. G. (2021). Comparative methods analysis on rates of cutaneous evaporative water loss (CEWL) in cattle. *Journal of Thermal Biology*, 97, 102879.
- DaSilva, R. G. D. (2000). Um modelo para a determinação do equilíbrio térmico de bovinos em ambientes tropicais. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 29, 1244-1252.
- DaSilva, R. G., & Maia, A. S. C. (2012). *Principles of animal biometeorology (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- DaSilva, R. G., Guilhermino, M. M., & de Moraes, D. A. E. F. (2010). Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture. *International journal of biometeorology*, 54(1), 5-11.
- DaSilva, R. G., La Scala Jr, N., & Tonhati, H. (2003). Radiative properties of the skin and haircoat of cattle and other animals. *Transactions of the ASAE*, 46(3), 913.

- De Melo Costa, C. C., Maia, A. S. C., Brown-Brandl, T. M., Neto, M. C., & Fonsêca, V. D. F. C. (2018). Thermal equilibrium of Nellore cattle in tropical conditions: an investigation of circadian pattern. *Journal of thermal biology*, 74, 317-324.
- Finch, V. A., Bennett, I. L., & Holmes, C. R. (1984). Coat colour in cattle: effect on thermal balance, behaviour and growth, and relationship with coat type. *The Journal of Agricultural Science*, 102(1), 141-147.
- Fonsêca, V. F., Saraiva, E. P., Maia, A. S., de Melo Costa, C. C., dos Santos, S. G. C., Morais, L. K., ... & Neto, M. C. (2019). Training sheep for indirect calorimetry trials. *Small Ruminant Research*, 177, 36-43.
- Gebremedhin, K. G., Fonseca, V. D., & Maia, A. S. (2023). Methods, Thermodynamic Applications, and Habitat Implications of Physical and Spectral Properties of Hair and Haircoats in Cattle. *Animals*, 13(19), 3087.
- Gebremedhin, K. G., Hillman, P. E., Lee, C. N., Collier, R. J., Willard, S. T., Arthington, J. D., & Brown-Brandl, T. M. (2008). Sweating rates of dairy cows and beef heifers in hot conditions. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2167-2178.
- Hahn, G. L. (1999). Dynamic responses of cattle to thermal heat loads. *Journal of animal science*, 77(suppl\_2), 10-20.
- Hansen, P. J. (2004). Physiological and cellular adaptations of zebu cattle to thermal stress. *Animal reproduction science*, 82, 349-360.
- Hillman, P. E., Lee, C. N., Carpenter, J. R., Baek, K. S., & Parkhurst, A. (1998). Impact of hair color on thermoregulation of dairy cows to direct sunlight. In 2001 ASAE annual meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Hungerford, L. L., Buhman, M. J., Dewell, R. D., Mader, T. L., Griffin, D., Smith, D. R., & Nienaber, J. A. (2000). Investigation of heat stress mortality in four midwest feedlots. In *Int. Symp. on Vet. Epi. and Econ* (Vol. 616, pp. 430-433).
- Lin, X., and D. Zhang. 1999. Inference in generalized additive mixed models by using smoothing splines. *J. R. Stat. Soc. Series B Stat. Methodol.* 61:381–400.

- Mader, T. L., Davis, M. S., & Brown-Brandl, T. (2006). Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle. *Journal of animal science*, 84(3), 712-719.
- Maia, A. S. C., DaSilva, R. G., & Battiston Loureiro, C. M. (2005). Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. *International Journal of Biometeorology*, 50, 17-22.
- Maia, A. S., Moura, G. A., Fonsêca, V. F., Gebremedhin, K. G., Milan, H. M., Chiquitelli Neto, M., ... & Pacheco, R. D. L. (2023). Economically sustainable shade design for feedlot cattle. *Frontiers in Veterinary Science*, 10, 1110671.
- Maia, A. S., Nascimento, S. T., Nascimento, C. C., & Gebremedhin, K. G. (2016). Thermal equilibrium of goats. *Journal of Thermal Biology*, 58, 43-49.
- Mitchell, D., Snelling, E. P., Hetem, R. S., Maloney, S. K., Strauss, W. M., & Fuller, A. (2018). Revisiting concepts of thermal physiology: predicting responses of mammals to climate change. *Journal of Animal Ecology*, 87(4), 956-973.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic Press.
- Moura, G. A. B., de Melo Costa, C. C., Fonsêca, V. D. F. C., Wijffels, G., Castro, P. A., Neto, M. C., & Maia, A. S. C. (2021). Are crossbred cattle (F1, *Bos indicus* x *Bos taurus*) thermally different to the purebred *Bos indicus* cattle under moderate conditions?. *Livestock Science*, 246, 104457.
- Moura, Gustavo André Bernado, et al. "Indicadores bioclimáticos e simulação de potenciais perdas econômicas da produção de leite em Pernambuco." *Agrometeoros* 27.2 (2020).
- R Core Team. 2024. *A language and environment for statistical computing*. Version 4.1.1. R Foundation for Statistical Computing.
- Robertshaw, D. (2006). Mechanisms for the control of respiratory evaporative heat loss in panting animals. *Journal of Applied Physiology*, 101(2), 664-668.
- Simão, B.R., Maia, A.S.C., Chiquitelli Neto, M., Culhari, E.C., Castro, P.A., Fonseca, V.F.C., 2017. A way to measure surface area in livestock, In *Proceedings of the*

21st International Congress of Biometerology, Durham, United Kingdom, pp. 100–104.

Wood, S. N. 2011. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. R. Stat. Soc. B.* 73:3–36.

## 4.7 Figures

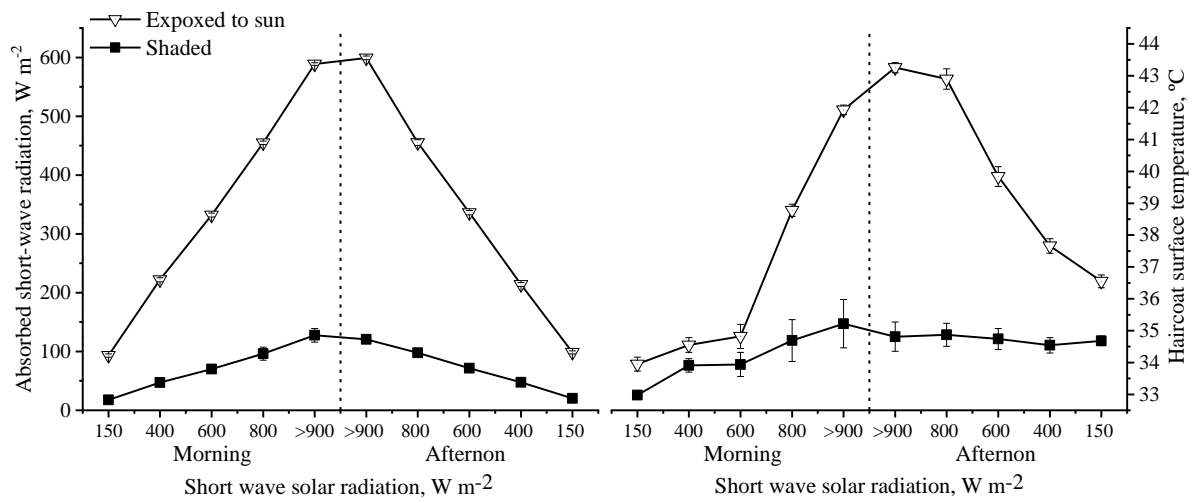


Figure 1 Least square ( $\pm$ SEM) means of the absorbed short-wave radiation and haircoat surface temperature for the radiation classes 150 W m<sup>-2</sup> (0 to 300 W m<sup>-2</sup>), 400 W m<sup>-2</sup> (300 to 500 W m<sup>-2</sup>), 600 W m<sup>-2</sup> (500 to 700 W m<sup>-2</sup>), 800 W m<sup>-2</sup> (700 to 900 W m<sup>-2</sup>) and > 900 W m<sup>-2</sup>, for the morning and afternoon shifts.

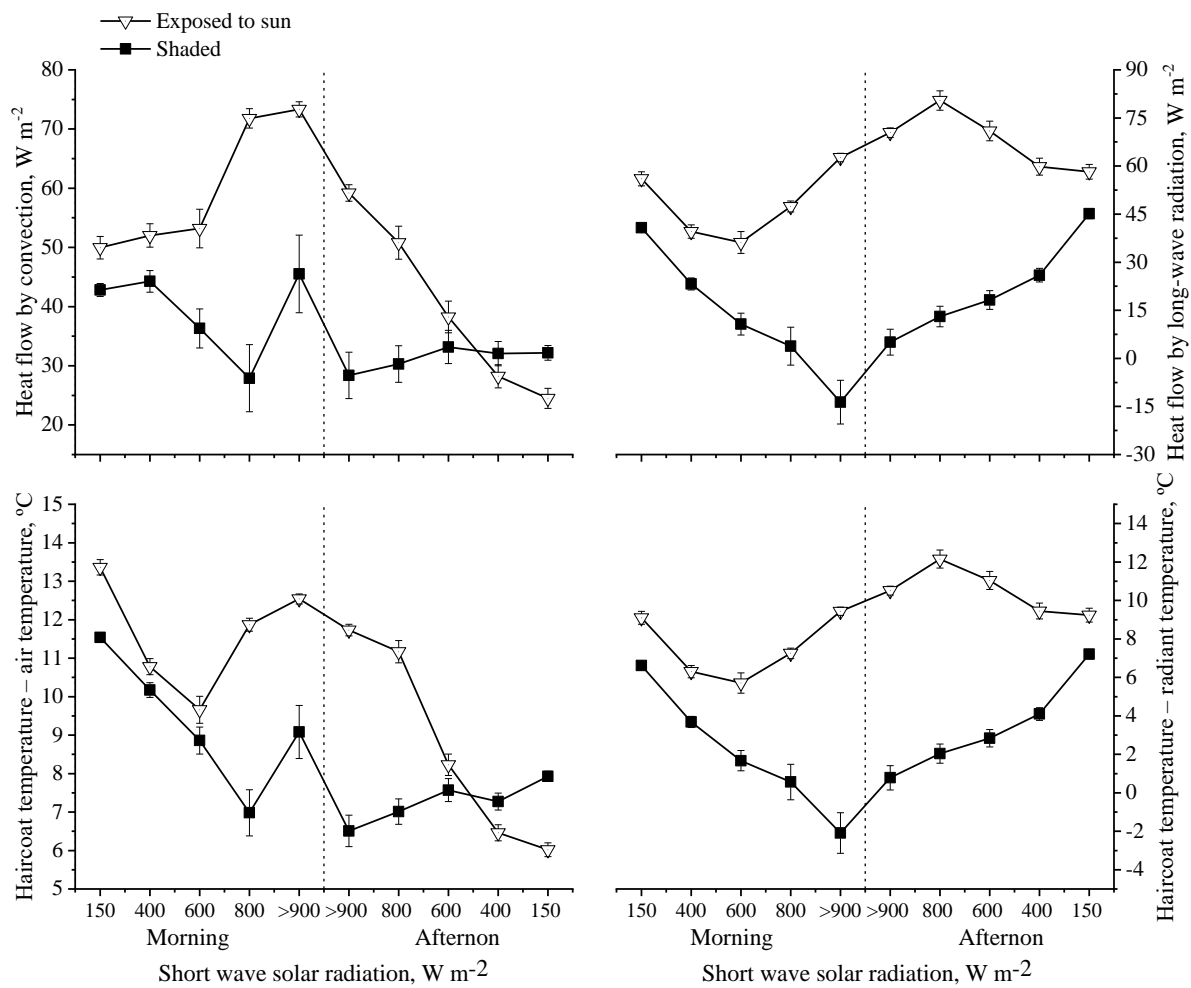


Figure 2 Least square ( $\pm SEM$ ) means of the Heat flow by long-wave radiation, Heat flow by convection and temperature gradient between Haircoat temperature and air temperature, and Haircoat temperature and radiant temperature for the radiation classes  $150 W m^{-2}$  (0 to  $300 W m^{-2}$ ),  $400 W m^{-2}$  ( $300$  to  $500 W m^{-2}$ ),  $600 W m^{-2}$  ( $500$  to  $700 W m^{-2}$ ),  $800 W m^{-2}$  ( $700$  to  $900 W m^{-2}$ ) and  $> 900 W m^{-2}$ , for the morning and afternoon shifts.

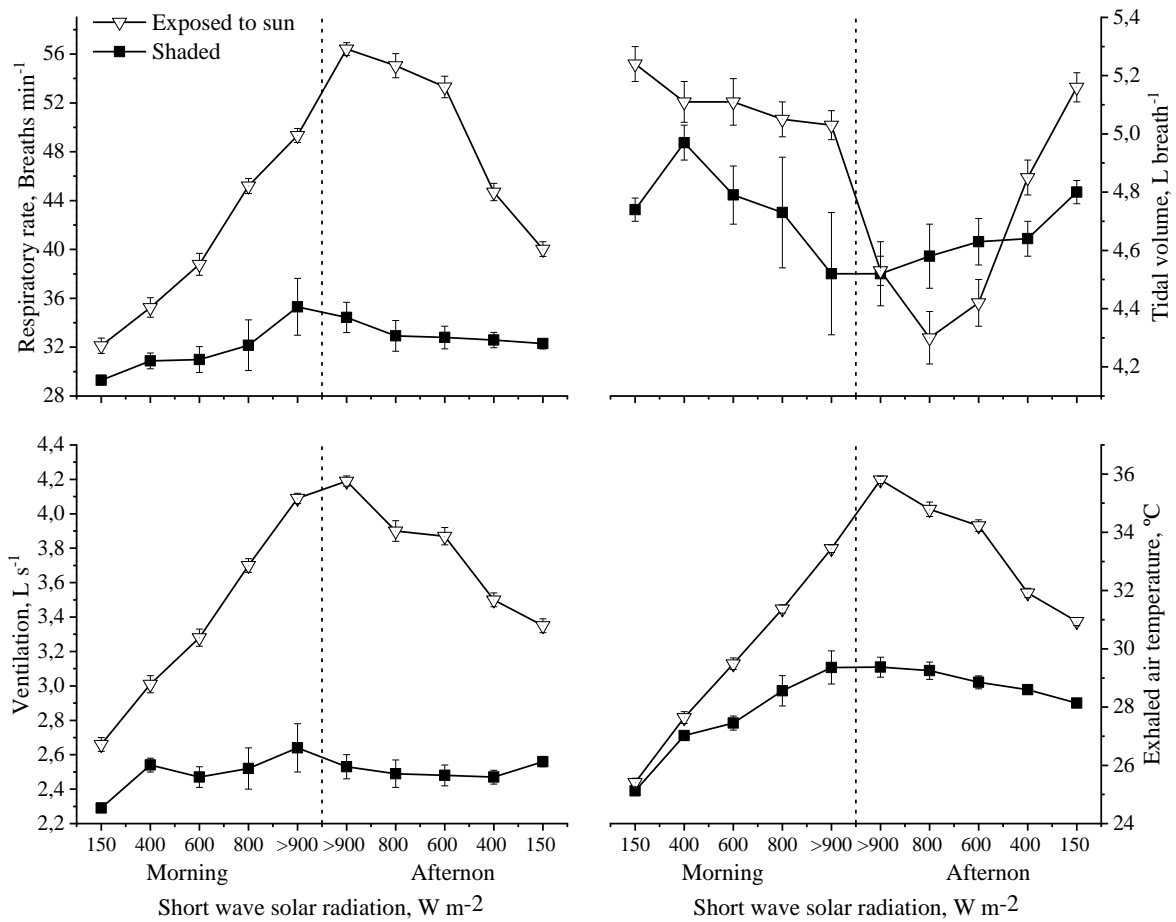


Figure 3 Least square ( $\pm$ SEM) means of the respiratory rate, tidal volume, respiratory volume, and exhaled air temperature for the radiation classes 150 W m<sup>-2</sup> (0 to 300 W m<sup>-2</sup>), 400 W m<sup>-2</sup> (300 to 500 W m<sup>-2</sup>), 600 W m<sup>-2</sup> (500 to 700 W m<sup>-2</sup>), 800 W m<sup>-2</sup> (700 to 900 W m<sup>-2</sup>) and > 900 W m<sup>-2</sup>, for the morning and afternoon shifts.

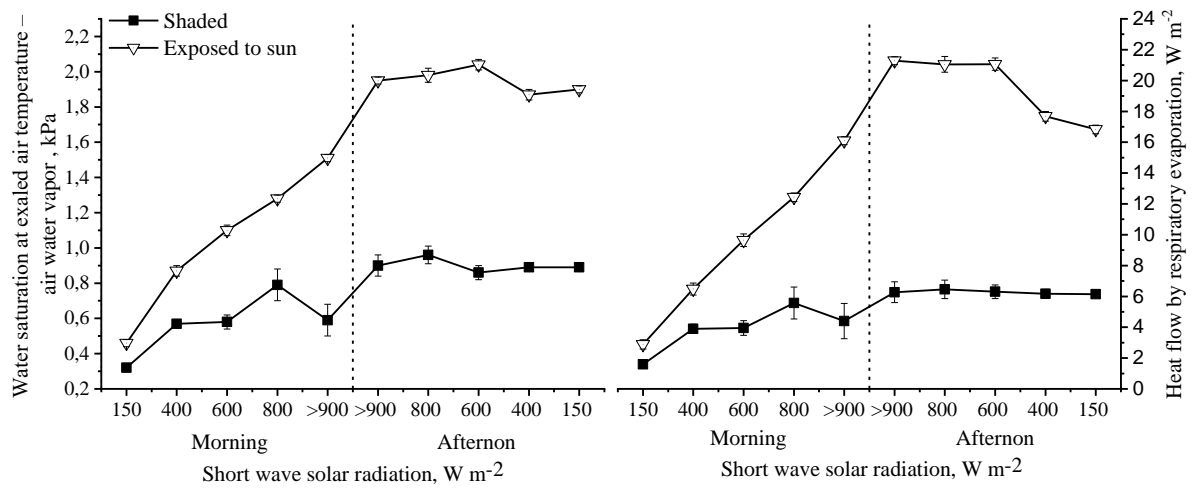


Figure 4 Least square ( $\pm$ SEM) means of the pressure gradient between saturation pressure of the skin and saturation pressure of the atmosphere and respiratory evaporative heat flow for the radiation classes 150 W m<sup>-2</sup> (0 to 300 W m<sup>-2</sup>), 400 W m<sup>-2</sup> (300 to 500 W m<sup>-2</sup>), 600 W m<sup>-2</sup> (500 to 700 W m<sup>-2</sup>), 800 W m<sup>-2</sup> (700 to 900 W m<sup>-2</sup>) and > 900 W m<sup>-2</sup>, for the morning and afternoon shifts.

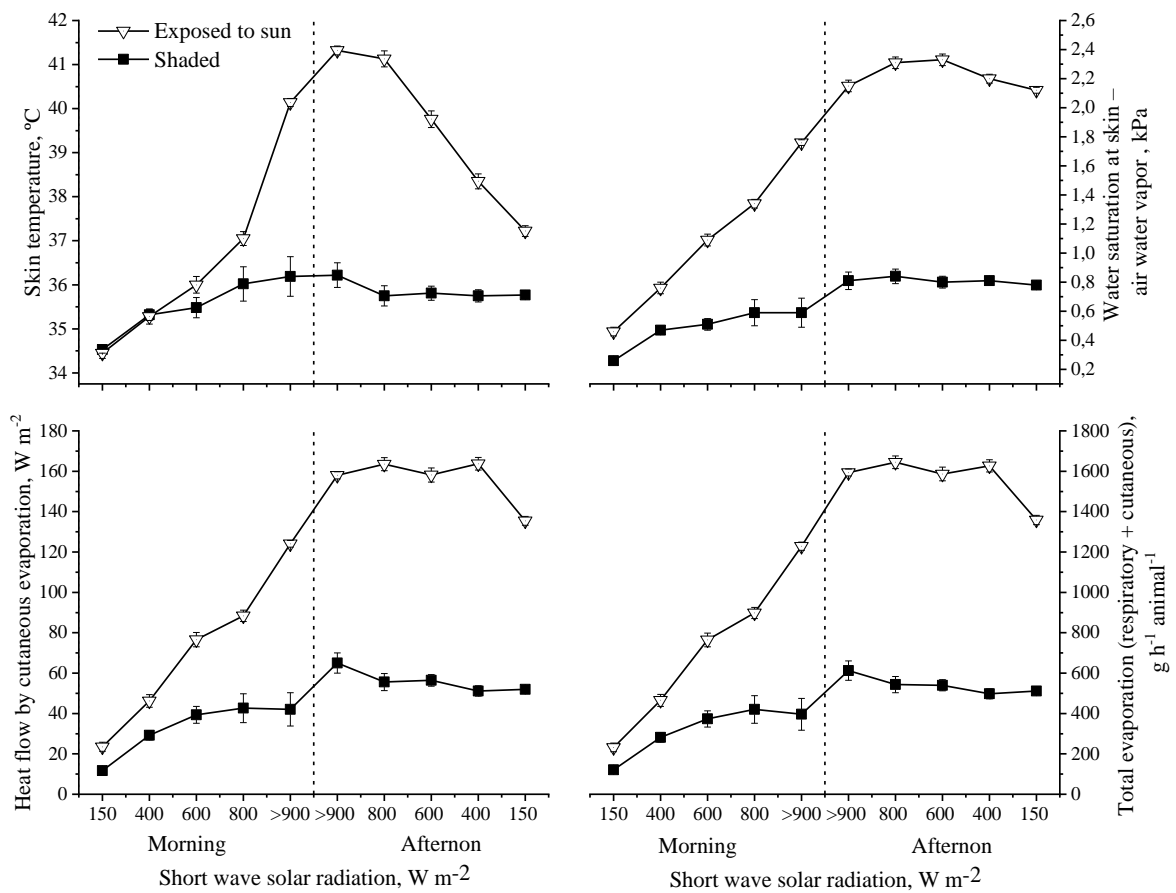


Figure 5 Least square ( $\pm$ SEM) means of the skin temperature, pressure gradient between water saturation at skin and air water vapor, heat flow by cutaneous evaporation, and evaporation total for the radiation classes 150 W m<sup>-2</sup> (0 to 300 W m<sup>-2</sup>), 400 W m<sup>-2</sup> (300 to 500 W m<sup>-2</sup>), 600 W m<sup>-2</sup> (500 to 700 W m<sup>-2</sup>), 800 W m<sup>-2</sup> (700 to 900 W m<sup>-2</sup>) and > 900 W m<sup>-2</sup>, for the morning and afternoon shifts.

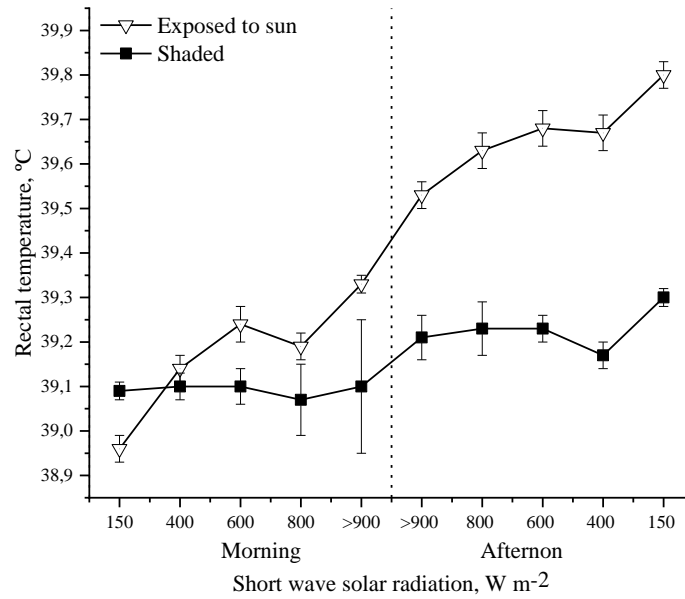


Figure 6 Least square ( $\pm$ SEM) means of the rectal temperature for the radiation classes 150 W m<sup>-2</sup> (0 to 300 W m<sup>-2</sup>), 400 W m<sup>-2</sup> (300 to 500 W m<sup>-2</sup>), 600 W m<sup>-2</sup> (500 to 700 W m<sup>-2</sup>), 800 W m<sup>-2</sup> (700 to 900 W m<sup>-2</sup>) and > 900 W m<sup>-2</sup>, for the morning and afternoon shifts.

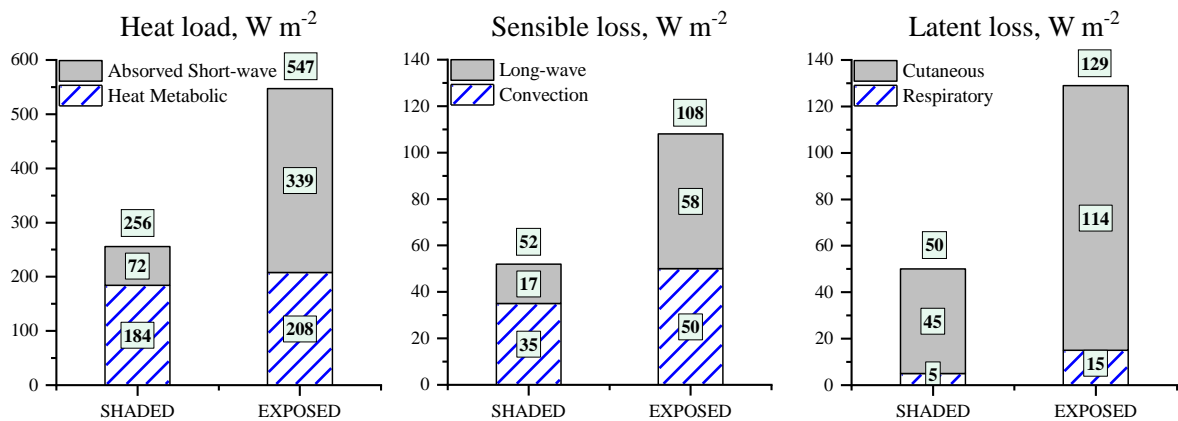


Figure 7 Least square means heat metabolic, absorbed short-wave, heat loss by long-wave, heat loss by convection, heat loss by evaporation cutaneous, and heat loss by evaporation respiratory.

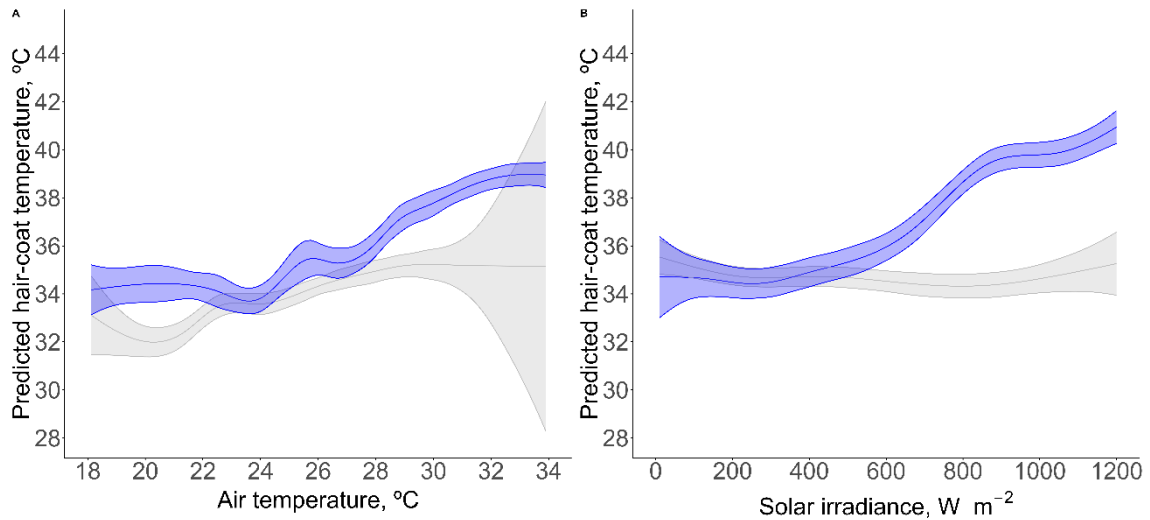


Figure 8 Hair-coat surface temperature predicted by the GAM model for the partial effects of air temperature ( $T_{ar}$ , A) and solar irradiance ( $R_s$ , B). In the air temperature graph, solar irradiance was held constant at  $500 W m^{-2}$ , and in the solar irradiance graph, air temperature was held constant at  $27^{\circ}C$ . The lines represent the values predicted by the GAM model, while the shaded areas indicate the 95% confidence intervals. Animals kept in the shade are represented in gray, and those kept in the sun in blue.

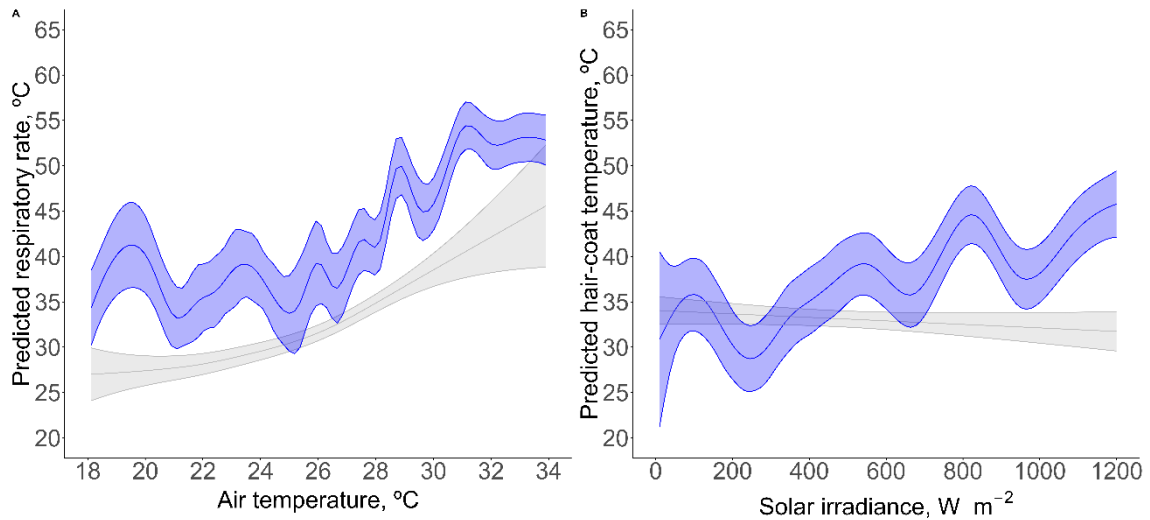


Figure 9 Respiratory rate predicted by the GAM model for the partial effects of air temperature (Tar, A) and solar irradiance (Rs, B). In the air temperature graph, solar irradiance was held constant at 500 W m<sup>-2</sup>, and in the solar irradiance graph, air temperature was held constant at 27°C. The lines represent the values predicted by the GAM model, while the shaded areas indicate the 95% confidence intervals. Animals kept in the shade are represented in gray, and those kept in the sun in blue.

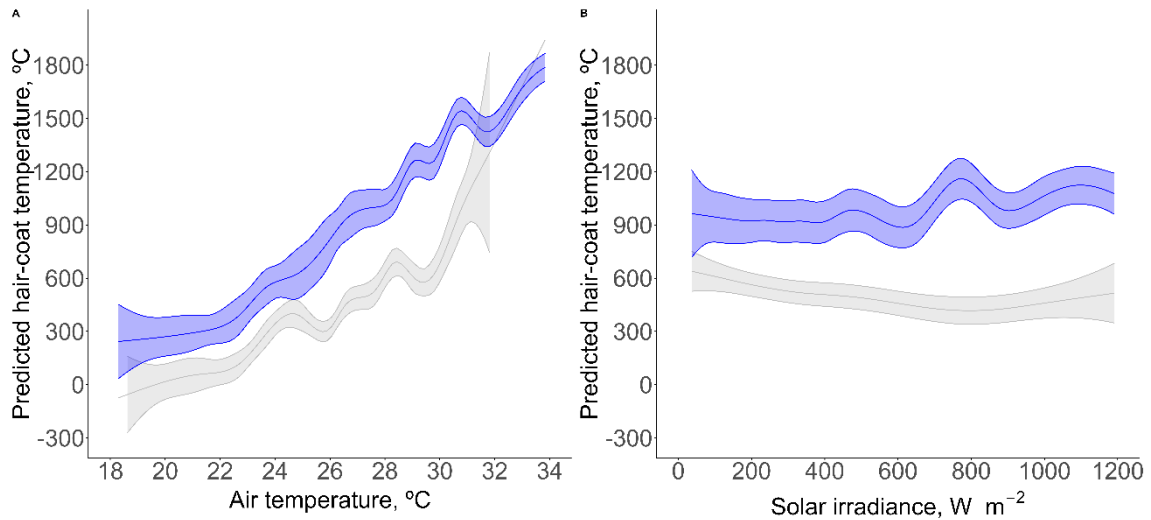


Figure 10 Evaporative water loss predicted by the GAM model for the partial effects of air temperature (Tar, A) and solar irradiance (Rs, B). In the air temperature graph, solar irradiance was held constant at 500 W m<sup>-2</sup>, and in the solar irradiance graph, air temperature was held constant at 27°C. The lines represent the values predicted by the GAM model, while the shaded areas indicate the 95% confidence intervals. Animals kept in the shade are represented in gray, and those kept in the sun in blue.