

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 19/03/2026.

**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

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

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 × 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
VINICIUS DE FRANÇA CARVALHO FONSECA
Data: 01/10/2024 14:07:48-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

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



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

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



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

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



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

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



Documento assinado digitalmente
RODRIGO DIAS LAURITANO PACHECO
Data: 09/04/2024 12:52:26-0300
Verifique em <https://validar.itl.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. Graduiu-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 Nº 2018/19148-1.

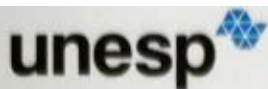
À equipe da Fundação de Apoio à Pesquisa, Ensino e Extensão (FUNEP).

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 AUTONÔMICAS 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 W m^{-2} , os bovinos expostos ao sol absorveram até 599 W m^{-2} de radiação solar de ondas curtas, enquanto os que estavam à sombra absorveram 127 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 W m^{-2}) e da convecção superficial (66 vs. 37 W m^{-2}). Os bovinos expostos ao sol aumentaram a demanda de perda de água por evaporação respiratória (19 vs. 5 W m^{-2} ou 190 vs. 56 g h^{-1}) e cutânea (140 vs. 53 W m^{-2} ou 1460 vs. 555 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 × 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* Nelore 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 (Nelore x Angus) kept exposed to solar radiation ($n = 6$; average weight 564.94 ± 41.17 kg) and shaded ($n = 6$; average weight 553.64 ± 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 W m^{-2} , sun exposed cattle absorbed up to 599 W m^{-2} by short-wave solar radiation, while those shaded 127 W m^{-2} . Under such circumstances, the former had higher hair-coat temperature (42.5 vs. $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$), which in turn, results on higher rates of heat transference to the environment through long-wave radiation (66.5 vs. -4 W m^{-2}) and surface convection (66 vs. 37 W m^{-2}). Sun exposed cattle increased demand for respiratory (19 vs. 5 W m^{-2} or 190 vs. 56 g h^{-1}) and cutaneous (140 vs. 53 W m^{-2} or 1460 vs. 555 g h^{-1}) evaporative water loss. Even so, they had greater oscillation of rectal temperature throughout the day (0.84 vs. $0.23 \text{ }^{\circ}\text{C}$) against those shaded. In conclusion, the sun exposed black-haired crossbred cattle (Nelore × 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 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.

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^{-2} on their body surface when solar irradiance exceeds 900 W m^{-2} . 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 ($310 \text{ vs. } 154 \text{ W m}^{-2}$) compared to those kept in the shade, which was reflected in a greater fluctuation in rectal temperature ($0.84 \text{ vs. } 0.23 \text{ }^{\circ}\text{C}$). 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*, 84(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 Guzarat 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 Nelore 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 411. 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.