

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

**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVA DE  
SOMBREAMENTO PARA NOVILHAS LEITEIRAS**

**Ana Flávia Prado Antunes de Faria**  
**Zootecnista**

**2020**

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

**PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVA DE  
SOMBREAMENTO PARA NOVILHAS LEITEIRAS**

**Ana Flávia Prado Antunes de Faria**

**Orientador: Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia**

**Coorientadora: Dra. Cíntia Carol de Melo Costa**

**Dissertação de mestrado  
apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias  
- Unesp, Câmpus de Jaboticabal,  
como parte das exigências para  
obtenção do título de Mestra em  
Zootecnia.**

**2020**

F224p

Faria, Ana Flávia Prado Antunes de

Painéis Fotovoltaicos: alternativa de sombreamento para novilhas leiteiras / Ana Flávia Prado Antunes de Faria. -- Jaboticabal, 2021  
46 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Alex Sandro Campos Maia

Coorientadora: Cíntia Carol de Melo Costa

1. Comportamento animal. 2. Novilhas leiteiras. 3. Painéis  
fotovoltaicos. 4. Fisiologia animal. 5. Sombreamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVA DE SOMBREAMENTO PARA NOVILHAS LEITEIRAS**

**AUTORA: ANA FLÁVIA PRADO ANTUNES DE FARIA**

**ORIENTADOR: ALEX SANDRO CAMPOS MAIA**

**COORIENTADORA: CÍNTIA CAROL DE MELO COSTA**

**COORIENTADORA: CAROLINA CARDOSO NAGIB NASCIMENTO**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ZOOTECNIA, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEX SANDRO CAMPOS MAIA

Departamento de Zootecnia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Profa. Dra. KÊNIA CARDOSO BÍCEGO (VIDEOCONFERÊNCIA)

Departamento de Morfologia e Fisiologia Animal / FCAV/UNESP P/

Profa. Dra. SHEILA TAVARES NASCIMENTO (VIDEOCONFERÊNCIA)

Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária-UnB / Brasília/DF P/

Jaboticabal, 17 de abril de 2020

### **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

Ana Flávia Prado Antunes de Faria nasceu em Coromandel no Estado de Minas Gerais no dia 27 de julho de 1992. Em 2013 ingressou no curso de Bacharelado em Zootecnia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, obtendo o título de Zootecnista em fevereiro de 2018. Foi bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e durante a graduação foi bolsista do Programa de Educação Tutorial (PET-Zootecnia). Em março de 2018 ingressou no curso de mestrado em Zootecnia no Programa de Pós-graduação em Zootecnia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, dedicando-se a área de Biometeorologia Animal. Atualmente é integrante do Grupo de Inovação em Biometeorologia, Ambiência e Bem-estar Animal (INO BIO-MANERA).

## **Epígrafe**

“Se você colocar todo o seu coração naquilo em que acredita, mesmo que seja algo que lhe deixe vulnerável, coisas surpreendentes podem e irão acontecer.”

Emma Watson

## **Dedicatória**

Dedico o meu trabalho à minha família (Ana Cristina, Ana Paula e Bud).

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus, por tudo que provê em minha vida.

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

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela bolsa de mestrado acadêmico concedida (proc. nº 1773014/2018 e 88882.330297/2019-01).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte técnico (proc. nº 2014 / 09639-7 e 2011 / 17388-6).

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia, pela oportunidade e confiança de trabalhar no grupo INOBIO-MANERA e por todos os ensinamentos compartilhados.

À minha Coorientadora, Dr. Cíntia Carol de Melo Costa pela amizade, companheirismo, paciência e ensinamentos.

Às Professoras Ana Cláudia Ruggieri e Sheila Tavares Nascimento por compor a banca de qualificação.

Às Professoras Kênia Cardoso Bicego e Sheila Tavares Nascimento por compor a banca de defesa de dissertação.

Ao Setor de Bovinocultura de Leite da FCAV em especial às Professoras Maria Imaculada Fônsaca e Ana Cláudia Ruggieri, bem como aos funcionários Antônio Carlos (Beterraba), Waldemir (Marrom) e Jair (Biro) por disponibilizarem os animais, e terem me ajudado tanto na realização desse trabalho.

Ao Grupo de Inovação em Biometeorologia, Ambiência e Bem-Estar Animal (INOBIOMANERA), a todos os integrantes/amigos do grupo que me ajudaram nessa jornada, em especial: Angela, Caio, Carolina, Cíntia, Eric, Gustavo, Larissa, Patric e Vinicius, companheiros do dia-a-dia.

Aos autores do artigo fruto desse trabalho por toda colaboração: Gustavo Moura, Dra. Cíntia Melo da Costa, Dr. Vinícius Fonseca, Dr. Hugo Milan e Prof. Dr. Alex Maia.

Às estagiárias que participaram da execução do meu experimento, Letícia e Thaisy.

Aos funcionários da FCAV que me ajudaram na execução do trabalho: Carlinhos e Turquinho



À minha mãe, Ana Cristina e minha irmã, Ana Paula que são a base da minha família, são pessoas excepcionais, que me apoiaram muito durante toda a minha caminhada acadêmica e que com certeza sem elas eu não conseguiria chegar aonde estou.

Ao meu pai, Marcus (*in memoriam*), que fez parte dessa longa caminhada, mesmo que longe.

À minha avó, Josilda, que contribuiu muito, com muito amor e carinho durante toda minha vida.

Aos meus avôs, João Faria (*in memoriam*) e Antunes (*in memoriam*), que fizeram parte da minha vida com muito carinho e me ajudaram a ser o que sou hoje.

Aos meus primos, Lohana, Hans e Yasmin, que são muito mais do que primos e sim irmãos que estão todos os dias presentes em minha vida.

Ao meu amor, Bud, que é muito mais do que um cão, é um cão cheio de carinho, que, nos dias difíceis, nele eu encontro carinho sincero e amor que não tem como comparar.

Ao meu namorado, Wander Junior, que sempre me apoia nas minhas decisões e que com muito carinho me ajuda a trilhar a nossa vida.

À minha amiga Marina (7-mês) pela amizade, caronas e cumplicidade de todos os dias que com certeza faz toda diferença.

Aos meus sogros, Solange e Wander, que formam uma família com quem eu sempre posso contar, conversar e me aconselhar, que certamente foram muito importantes na minha vida e que guardo com muito carinho.

Ao amigo Gustavo, que sem nem mesmo eu precisar pedir estava lá, me ajudando, tornando esse trabalho mais fácil, contribuindo. Sou muito grata pela amizade, ajuda e confiança.

Aos amigos Caio e Eric, que junto ao Gustavo também me ajudaram em um momento muito difícil, cuidaram das coisas por mim, eu nunca vou esquecer da ajuda de vocês.

Aos amigos Aruera: Caroline, Caio, Mayara, Philip e Thomaz pela amizade e desabafos.

À todos que, de alguma forma, me ajudaram a realizar essa caminhada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## SUMÁRIO

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Certificado da Comissão de Ética no Uso de Animais .....                                             | iii |
| RESUMO.....                                                                                          | iv  |
| ABSTRACT .....                                                                                       | v   |
| 1 CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                                                            | 1   |
| 1.1 INTRODUÇÃO .....                                                                                 | 1   |
| 1.2 REVISÃO DE LITERATURA .....                                                                      | 2   |
| 1.2.1 A atividade da bovinocultura leiteira no Brasil .....                                          | 2   |
| 1.2.2 Conforto térmico .....                                                                         | 4   |
| 1.2.3 Painéis fotovoltaicos como sombreamento .....                                                  | 7   |
| 1.3 OBJETIVOS .....                                                                                  | 9   |
| 1.3.1 Objetivo Geral.....                                                                            | 9   |
| 1.3.2 Objetivos Específicos .....                                                                    | 9   |
| 1.4 REFERÊNCIAS.....                                                                                 | 10  |
| 2 CAPÍTULO 2 – Photovoltaic panels as alternative shading to dairy heifers in grazing system § ..... | 16  |
| ABSTRACT .....                                                                                       | 16  |
| INTRODUCTION.....                                                                                    | 17  |
| MATERIALS AND METHODS .....                                                                          | 20  |
| <i>Animals and collected data</i> .....                                                              | 20  |
| <i>Environmental measurements</i> .....                                                              | 20  |
| <i>Body temperatures and respiratory rate</i> .....                                                  | 21  |
| <i>Behavioral evaluation</i> .....                                                                   | 22  |
| <i>Thermal comfort evaluation</i> .....                                                              | 22  |
| <i>Electricity generation and CO<sub>2</sub> savings by photovoltaic panels</i> .....                | 23  |
| <i>Statistical Analysis</i> .....                                                                    | 23  |

|                                                                                       |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| RESULTS.....                                                                          | 24        |
| <i>Meteorological variables and thermal comfort evaluation .....</i>                  | <i>24</i> |
| <i>Behavioral responses .....</i>                                                     | <i>25</i> |
| <i>Body temperatures and respiratory rate .....</i>                                   | <i>26</i> |
| <i>Electricity generation and CO<sub>2</sub> savings by photovoltaic panels .....</i> | <i>26</i> |
| <i>Index of Shade Time (IST).....</i>                                                 | <i>26</i> |
| DISCUSSION.....                                                                       | 27        |
| CONCLUSION .....                                                                      | 30        |
| ACKNOWLEDGMENTS.....                                                                  | 31        |
| REFERENCES.....                                                                       | 31        |
| TABLES AND FIGURES .....                                                              | 38        |

## Certificado da Comissão de Ética no Uso de Animais



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

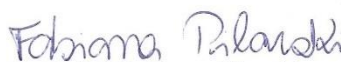


### CEUA – COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS

#### DECLARAÇÃO

Declaramos que o trabalho de pesquisa intitulado **"Eficiência do sombreamento com painéis fotovoltaicos sobre as respostas comportamentais e fisiológicas de bezerras Holandesas"**, sob a responsabilidade do Prof. Dr. Alex Sandro Campos Maia e Certificado CEUA protocolo nº 013070/2018, aprovado em reunião ordinária em 10 de outubro de 2018, teve a inclusão do procedimento de coleta sanguínea para a avaliação plasmática de proteína total dos animais em até 48 horas da ingestão do primeiro colostro, aprovado em reunião ordinária de 06 de dezembro de 2018.

Jaboticabal, 06 de dezembro de 2018.

  
**Profª Drª Fabiana Pilarski**  
Coordenadora – CEUA

## **PAINÉIS FOTOVOLTAICOS: ALTERNATIVA DE SOMBREAMENTO PARA NOVILHAS LEITEIRAS**

**RESUMO** – O objetivo deste estudo foi avaliar a carga térmica radiante na sombra projetada por painéis fotovoltaicos e determinar o impacto nas respostas fisiológicas e comportamentais de novilhas leiteiras no uso ou não de sombra. Para tanto, foram utilizadas sete novilhas mestiças 7/8 da raça Holandesa, com idade média de 10 meses, manejadas em piquete com estrutura de sombreamento artificial provido por um conjunto de painéis fotovoltaicos. As temperaturas corporais (vaginal, temperatura da superfície da pele e do pelame, °C) e frequência respiratória (respirações minutos<sup>-1</sup>) na sombra ou expostas à radiação solar foram avaliadas durante 24 horas a cada 5 minutos. Observações comportamentais foram realizadas das 08:00 as 17:00h, em intervalos regulares de 5 minutos. As variáveis meteorológicas (temperatura e umidade do ar, irradiância solar e velocidade do vento) foram medidas em intervalos regulares de 1 minuto durante 24 horas. A estrutura de sombra foi composta por 10 painéis fotovoltaicos, projetando 19,3 m<sup>2</sup> de sombreamento, gerando uma média mensal de 405,78 kWh. Na primeira hora do dia, as novilhas despenderam 90% do tempo expostas à radiação solar, permanecendo em atividade de pastejo. Com o aumento da temperatura do ar e radiação solar, o tempo gasto na sombra nas atividades de ruminação e ócio, em pé ou deitado aumentou até 13:00h, totalizando cerca de 80% do tempo nessas atividades. Aparentemente, a variação diária da temperatura vaginal dos animais não foi afetada pelo uso da sombra projetada pelos painéis. As temperaturas da superfície da pele e do pelame atingem os valores mais altos quando os animais são expostos à radiação solar. A frequência respiratória exibe o mesmo comportamento das temperaturas da superfície, e por volta de 14:00h atingindo uma média de 92 respirações minutos<sup>-1</sup>. A carga térmica radiante foi cerca de 27% menor sob a estrutura de sombra, o que mostra que os animais usam sombra porque oferece uma melhor condição de conforto térmico, controlando as temperaturas internas e de superfície e a taxa respiratória. Portanto, fornecer sombra dos painéis fotovoltaicos ajuda na termorregulação dos animais, melhorando seu bem-estar e gerando energia limpa e renovável.

**Palavras-chave:** comportamento, novilha leiteira, painel fotovoltaico, fisiológico, sombra

## PHOTOVOLTAIC PANELS: SHADING ALTERNATIVE FOR DAIRY HEIFERS

**ABSTRACT**– The aim of this study was to evaluate the radiant heat load in the shadow projected by photovoltaic panels and to determine the impact on the physiological and behavioral responses of dairy heifers in the use or not of shade. For this purpose, seven 7/8 Holstein heifers, with an average age of 10 months, were used in paddocks with artificial shading structure provided by a set of photovoltaic panels. Body temperatures (vaginal, skin and hair coat surface temperature, ° C) and respiratory rate (breaths min<sup>-1</sup>) in the shade or exposed to solar radiation were assessed for 24 hours every 5 minutes. Behavioral observations were made from 08:00 to 17:00, at regular intervals of 5 minutes. The meteorological variables (air temperature and humidity, solar irradiance and wind speed) were measured at regular intervals of 1 minute for 24 hours. The shade structure was composed of 10 photovoltaic panels, projecting 19.3 m<sup>2</sup> of shading, generating a monthly average of 405.78 kWh. In the first hour of the day, heifers spent 90% of their time exposed to solar radiation, remaining in grazing activity. With the increase in air temperature and solar radiation, the time spent in the shade in the activities of rumination and idling, standing or lying increased until 13:00, totaling about 80% of the time in these activities. Apparently, the daily variation of the animals' vaginal temperature was not affected by the use of the shade projected by the panels. The surface temperatures of the skin and hair coat surface reach the highest values when animals are exposed to solar radiation. The respiratory rate exhibits the same behavior as the surface temperatures, and at about 14:00 reaching an average of 92 breaths minutes<sup>-1</sup>. The radiant heat load was about 27% lower under the shade structure, which shows that animals use shade because they offer a better condition of thermal comfort, controlling internal and surface temperatures and the respiratory rate. Therefore, providing shade from the photovoltaic panels helps in the thermoregulation of animals, improving their welfare and generating clean and renewable energy.

**Keywords:** behavior, dairy heifer, photovoltaic panel, physiological, shade

## **1 CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

O conforto térmico é um dos fatores mais importantes a serem considerados para a criação de ruminantes (Silanikove, 2000), principalmente no Brasil, onde ocorre alta incidência de radiação solar que desafia a termorregulação desses animais (da Silva et al., 2012). No intuito de reduzir o estresse térmico, prevenir o aumento da temperatura corporal e promover o conforto térmico é recomendado que animais taurinos leiteiros manejados em ambientes tropicais com temperaturas médias acima de 24°C, devam ter acesso à sombra durante todo o período de alojamento (Silanikove, 2000; Brouček et al., 2008; Schütz et al., 2010) para diminuir o ganho de calor por radiação solar (Van laer et al., 2014).

Em locais onde não haja sombreamento natural, estratégias de sombreamento artificial podem ser utilizadas. Estruturas de sombreamento utilizando malha de polietileno, sombrite, podem ser um caminho viável para oferecer sombreamento artificial para animais, pois apresenta baixo custo de instalação. No entanto, a rápida depreciação da malha de polietileno utilizada na cobertura, necessidade de manutenção periódica, além da falta de evidências acerca de seu retorno econômico aplicado diretamente no recurso tem sido um entrave na adoção do sombreamento artificial (Conceição, 2008). Outro fator importante a ser considerado nos modelos de sombreamento artificial é a quantidade radiação solar bloqueada pelas estruturas, malhas de sombrites podem bloquear de 30 a 80% da radiação solar incidente. Estudos têm demonstrado que animais preferem estruturas de sombra que bloqueiem 100 % da radiação solar (Tucker et al., 2008; Schütz et al., 2009; Oliveira et al., 2014 and 2019)

Oliveira et al. (2019), por exemplo, estudaram em vacas holandesas o tempo de uso de sombra projetada por malhas de polietileno que bloqueavam a radiação solar em 30%, 50%, 70% e 100%. Os animais passaram cerca de 60% do tempo nas horas mais quentes do dia na projeção de sombra que bloqueava 100% da radiação solar e somente 25% do tempo naquela que bloqueava 30% da radiação. Torres Campos et al. (2005) observaram que a carga térmica radiante na área sombreada

pela projeção de estruturas cobertas por sombrites que bloqueavam de 50% da radiação solar e aquelas sem sombra era praticamente a mesma. Já Cunha et al. (2007) concluíram que sombrites com 70% de bloqueio da radiação solar ainda assim gera desconforto térmico a bezerros leiteiros, pois a frequência respiratória encontrou-se acima da faixa considerada fisiologicamente normal. Esses resultados mostraram que a cobertura de um sombreamento artificial deve bloquear 100% da radiação solar, já que os níveis do bloqueio da radiação solar são importantes para o conforto térmico e na motivação do uso da sombra (Schütz et al., 2009; Maia et al., 2020).

Utilizar estratégias de manejo como o fornecimento de sombra para proteger os animais da excessiva exposição à radiação solar pode influenciar não apenas a resposta do animal ao calor, como pode gerar uma economia geral do sistema de produção (Brown-Brandl, 2018). Se por um lado a radiação solar é um problema, por outro ela gera energia elétrica pela conversão da radiação solar por painéis fotovoltaicos que ao mesmo tempo, pode propiciar sombreamento para os animais melhorando seu bem-estar, podendo gerar receita e reduzindo a emissão de gases do efeito estufa (Maia et al., 2020). Dessa forma, o desenvolvimento de mais pesquisas que forneçam dados consistentes para elaboração de relatórios mais precisos é imprescindível para desenvolvimento de projetos conciliando o sombreamento para animais com a geração de energia elétrica limpa e renovável.

## **1.2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1 A atividade da bovinocultura leiteira no Brasil**

Dentre os seis produtos mais importantes da agropecuária no Brasil encontra-se o leite bovino. Atualmente o Brasil está entre os maiores produtores, ocupando o quinto lugar no ranking mundial, ficando atrás apenas da União Europeia, Estados Unidos, Índia e China, respectivamente (CONAB, 2016). A produção no ano de 2017 foi de 30.156.279 mil litros (IBGE, 2017). A cadeia produtiva do leite desempenha também um importante papel social, principalmente na geração de empregos (EMBRAPA, 2002). Em 2015, o setor movimentou cerca de R\$ 28,9 bilhões. A perspectiva é de crescimento para os próximos anos e segundo o IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) a estimativa é de que, em 2026, a produção



deverá girar em torno de 37 milhões de litros, se o nível de consumo seguir o mesmo parâmetro atual, de 170 litros de leite/habitante/ano, considerando que a população brasileira será de 219 milhões de pessoas (Balde branco, 2016).

Entretanto foi observado que de 2013 a 2017 houve uma diminuição de 4,2% no número de vacas ordenhadas no rebanho brasileiro, apesar disso a média anual da produção total de leite aumentou 0,1% ao ano e, isso se deve ao crescimento médio anual da produtividade da vaca que aumentou em 4,4% para o mesmo período quando comparados com os dados dos anos anteriores (EMBRAPA, 2019). Esse aumento na produtividade mesmo com diminuição do rebanho é recorrente em todo o mundo; nos Estados Unidos, por exemplo, a produtividade por vaca aumentou 12,5% entre o período de 2008 e 2018 (Howard, 2018). Porém como visto anteriormente essa produtividade por vaca não é expressiva no rebanho brasileiro e alguns fatores ligados à criação dos bovinos leiteiros no Brasil influenciam essa quantidade e também a qualidade do leite, tais como a espécie animal, fatores genéticos, fatores fisiológicos, fatores nutricionais, fatores inerentes ao manejo, fatores patológicos e fatores ambientais (Leira et al., 2018).

Tendo em foco os fatores ambientais como um dos fatores que influenciam a pouco eficiente produção de leite por vaca no Brasil, devemos considerar que, devido ao predominante sistema de criação semi-intensivo à pasto, os animais passam a maior parte do dia, se não todo ele, expostos a um ambiente térmico desafiador, já que ficam expostos à radiação solar direta. A combinação de altas temperaturas, e altos índices de radiação solar podem ser causadores de estresse térmico nos animais.

#### **1.2.1.1 Novilhas leiteiras**

Fêmeas jovens denominadas novilhas integram a fase de recria dos animais, que vai desde o desmame (80-90 kg) até a primeira cobrição (puberdade) (EMBRAPA). É uma fase em que o animal não contribui com a renda leiteira da propriedade, sendo que o sucesso do investimento depende das condições de criação desses animais (IDEAGRI, 2015). Essa categoria animal requer atenção, pois quando os animais encontram-se em boas condições para a primeira cobrição e ao primeiro

parto a produção leiteira pode ser otimizada e vantajosa. Quanto menor o número de novilhas em um rebanho e maior sua taxa de concepção e parição, melhores serão os índices zootécnicos de uma propriedade (Bittar, 2012).

Alguns fatores influenciam no sucesso da taxa de concepção, taxa de parição e taxa de animais nascidos vivos e que sobrevivam pós-parto para as novilhas. A nutrição é um dos fatores que mais afeta os índices zootécnicos nessa fase, uma vez que a idade para primeira cobrição depende do peso dos animais, consequentemente um ganho de peso insuficiente pode causar atrasos na idade ao primeiro parto. Por outro lado, excesso de peso também pode comprometer a produção de leite futura. Ademais, bezerros e vacas no período de lactação quando expostos ao estresse térmico por calor apresentam uma diminuição do consumo alimentar e consequente diminuição no ganho de peso diário, quando comparados com animais que não foram submetidos ao estresse térmico (Tao e Rivas, 2018; Kóvacs et al., 2018)

Alguns novos estudos evidenciaram que animais jovens submetidos a altas cargas de radiação solar apresentaram retardo no período reprodutivo, dificultando a detecção do cio, maior ocorrência de abortos gestacionais, diminuição no tempo de gestação, menor ganho de peso fetal (Monteiro et al., 2016), maior taxa de mortalidade prematuras (West, 2003; Nilforooshan e Edriss, 2004; Avedaño-Reyes, 2009; Scavanez et al., 2018), além de prejudicar a produção de leite pela glândula mamária (Tao et al., 2018), fatores esses que devem explicar a baixa fertilidade e repetição de serviços em novilhas (Ferreira, 2012). Portanto, o fornecimento de alguma estrutura (natural ou artificial) que possa proteger os animais contra o excesso da radiação solar é um caminho para melhorar o conforto térmico de novilhas e, assim, maximizar ganho de peso, idade de cobrição e melhorar os índices reprodutivos.

### **1.2.2 Conforto térmico**

Bovinos são animais homeotérmicos, os quais regulam sua temperatura corporal dentro de níveis estreitos de variação. Assim como outros homeotérmicos, possuem uma Zona de Termoneutralidade (ZTN); uma faixa de temperatura ambiente em que a regulação da temperatura corporal é atingida sem alterações na produção

de calor metabólico ou na ativação da perda de calor por evaporação e nem respostas efetivas aos mesmos, sendo limitada por uma Temperatura Crítica Inferior (TCI) e Temperatura Crítica Superior (TCS) (Figura 1). Considera-se que os animais quando estão nessa ZTN estão em conforto térmico (Silva e Maia, 2012), tendo potencial de expressar seu máximo potencial genético. Quando a temperatura ambiente está abaixo da TCI o animal encontra-se em estresse térmico por frio e quando essa temperatura se encontra acima da TCS em estresse térmico por calor.

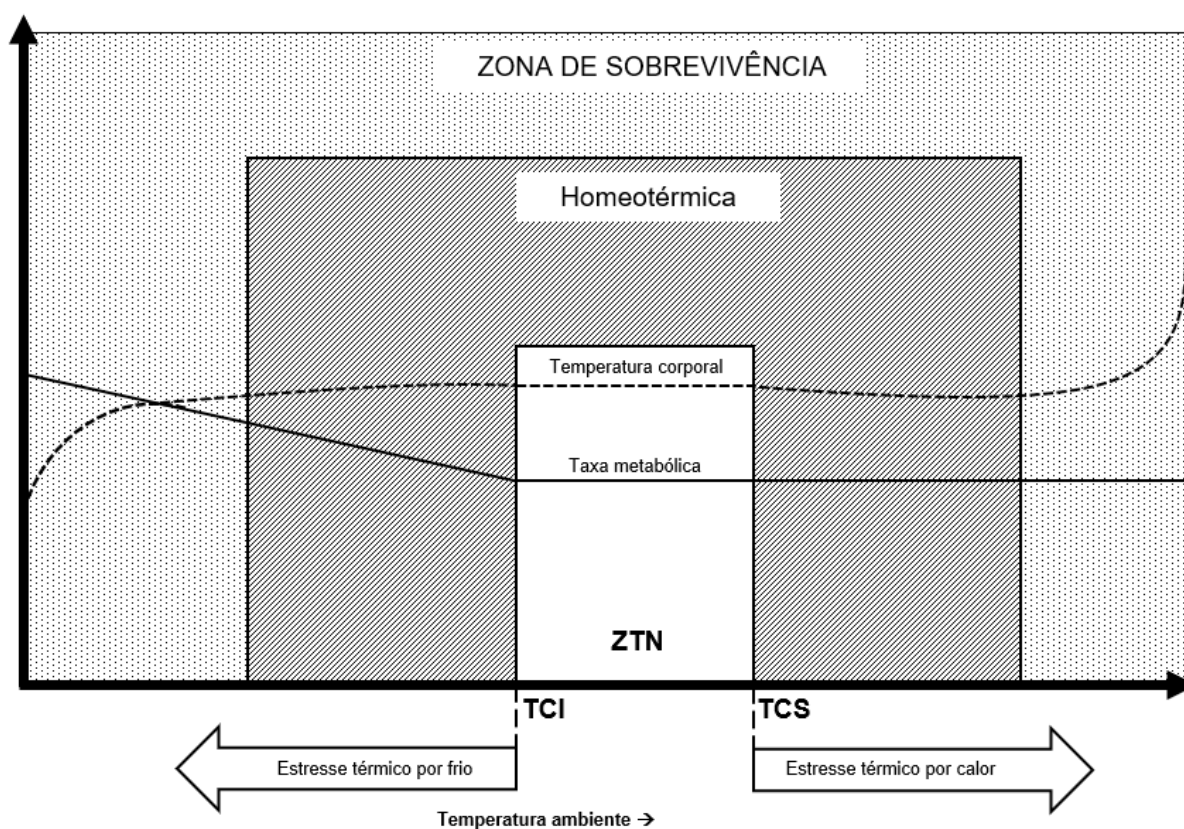


Figura 1 – Representação esquemática da Zona de Termoneutralidade (ZTN) e limites de Temperatura Crítica Inferior (TCI) e Temperatura Crítica Superior (TCS) – Adaptado de Silva e Maia (2012)

De acordo com Huber (1990) para vacas taurinas em lactação a ZTN é adequada entre 4 e 26°C, para o gado mestiço essa ZTN está entre 5 a 31°C (Nããs, 1989) e depende da idade, espécie, raça, consumo alimentar, aclimatização, nível de produção, isolamento externo do animal, entre outros (Yousef, 1985; Roenfeldt,

1998). Dessa forma, é crescente a preocupação com o conforto térmico animal para regiões onde as médias de temperatura do ar são mais altas que os valores acima. Considerando que o Brasil é um país tropical, onde ocorre uma alta incidência de radiação solar e consequente elevada carga térmica radiante e altas temperaturas que podem afetar as respostas fisiológicas e desafiar a termorregulação dos animais (da Silva et al., 2012). De fato, a termorregulação e conforto térmico de bovinos em ambiente intertropical tem sido frequentemente investigada por diversos autores (daSilva, 2000; Maia et al., 2005a; Maia et al., 2005b; Oliveira et al., 2014; Santos et al., 2017).

Em vista disso a exigência de sistemas de resfriamentos e/ou sombreamento aos animais em ambientes térmicos desafiadores vem como uma alternativa para reduzir os efeitos negativos do estresse térmico. Por exemplo, Silanikove (2000) recomenda que os animais taurinos leiteiros manejados em ambientes tropicais com temperatura média acima de 24°C, devem ter acesso à sombra durante todo o período de alojamento para promover o conforto térmico e melhorar as condições de bem-estar. No entanto, Oliveira et al. (2019) enfatizaram que para animais manejados em ambiente tropical o ambiente térmico radiante é o principal fator que afeta a motivação de bovinos leiteiros para uso da sombra; seus achados evidenciaram que, independente dos níveis de temperatura ambiente, vacas holandesas foram motivadas a buscar sombra quando os níveis de radiação solar estavam acima de 500 W m<sup>-2</sup>.

#### **1.2.2.1 Sombreamento para bovinos leiteiros**

Como dito anteriormente o sombreamento para bovinos vem sendo estudado como um recurso que auxilie os animais em seu processo termorregulatório, melhorando o conforto térmico e seu bem-estar. Existem duas opções de sombreamento, o natural (árvores) e o artificial. A preferência dos animais geralmente é pelo sombreamento natural das árvores (Pereira, 2005), devido ao microclima gerado (controle da radiação solar incidente e melhoria da variação de temperatura, luminosidade e umidade relativa) que a torna mais agradável (Carvalho et al., 2002).

Em pastagens com o uso de sombreamento natural há um isolamento térmico decorrente das árvores ao solo, que reduz o aquecimento pela radiação solar, além da baixa na refletância do solo, que afeta diretamente no conforto térmico dos animais, podendo apresentar uma carga térmica radiante de  $270 \text{ Wm}^{-2}$  mais baixa sob o abrigo da árvore do que em relação ao exposto ao sol (Silva e Maia, 2012). No entanto alguns problemas devem ser ponderados na escolha do sombreamento natural, poucos estudos fornecem informações sobre a melhor espécie a ser escolhida, recomenda-se que devem ser espécies que possam ser plantadas em pastos, devem ser resistentes aos animais, não podem ser tóxicas, a densidade e área da copa deve ser compatível ao número de animais, o tempo que ela demora para crescer e se tornar o recurso sombra e, árvores frutíferas como mangueiras e laranjeiras, por exemplo, devem ser evitadas pela facilidade da ingestão do fruto que pode bloquear o esôfago dos animais (Nããs, 1989; Silva e Maia, 2012).

Os níveis do bloqueio da radiação solar e a quantidade de sombra/animal oferecida são importantes para motivar o uso da sombra (Schütz et al., 2009; Schütz et al., 2010). O sombreamento artificial vem então como uma alternativa de sombreamento onde pode-se projetar uma área de sombra específica com um nível de bloqueio da radiação solar de acordo com a necessidade. O tempo de uso de sombra projetada por estrutura coberta por sombrites que bloqueavam 100% da radiação solar para vacas Holandesas demonstrou que os animais passaram cerca de 60% do tempo quando o nível da intensidade da radiação solar ultrapassava o valor de  $500 \text{ W m}^{-2}$  (Oliveira et al., 2019), quando comparado o uso simultâneo de sombreamentos que bloqueavam 25% e 99% da radiação solar, vacas Holandesas passaram cerca de 72% do tempo na estrutura de maior bloqueio da radiação solar (Schütz et al., 2009), indicando que a cobertura de um sombreamento artificial que bloqueia 100% da radiação solar deve ser preferido.

### **1.2.3 Painéis fotovoltaicos como sombreamento**

Uma alternativa ao modelo atual de sombreamento utilizando sombrite é a utilização de painéis fotovoltaicos para compor uma estrutura de sombra, sendo, uma cobertura de sombreamento que bloqueia 100% da radiação solar, que é sustentável

e apresenta um retorno econômico. Nessa direção a inovação é a geração de energia elétrica pela conversão da radiação solar por painéis fotovoltaicos que ao mesmo tempo, fornecem sombreamento para os animais, gera receita e reduzem a emissão de gases do efeito estufa.

Os sistemas de co-geração usando painéis fotovoltaicos têm potencial para aumentar a sinergia entre energias renováveis e produção agrícola, oferecendo microclimas mais frios para os animais (Adeh et al., 2018). De fato, benefícios comportamentais e produtivos para vacas e novilhas leiteiras que usam painéis solares como fonte de sombreamento foram relatados por agricultores americanos (Dickrell, 2018); quando Maia et al. (2020) estudaram a preferência de ovinos por estrutura de sombra com malha de sombrite 80% e a estrutura com painéis fotovoltaicos puderam concluir que os animais gastaram mais de 70% do tempo sob a estrutura dos painéis fotovoltaicos quando a radiação solar era igual ou superior a  $800 \text{ W m}^{-2}$ . O mesmo estudo evidenciou que os painéis geraram 5.19 MWh e reduziu 2.77 toneladas de  $\text{CO}_2$  a serem emitidos para a atmosfera, demonstrando a eficiência do uso dos painéis fotovoltaicos como fonte energética principalmente em locais onde a irradiância solar ultrapasse esses valores, como é o caso do Brasil (da Silva et al., 2010).

O Brasil apresenta um potencial de geração de energia solar fotovoltaica promissora devido ao fato de o país estar localizado predominantemente na Zona Intertropical, caracterizada por altos níveis de irradiância solar; porém hoje temos instalados apenas 1% da sua capacidade (MME, 2018). Outro aspecto importante para o desenvolvimento da energia solar são as políticas de incentivo à fabricação ou importação de equipamentos, e principalmente uma legislação atual sobre a comercialização da energia elétrica gerada conectada a rede (Nascimento, 2017). Frente a esse cenário o Brasil adotou, nos últimos anos políticas de incentivo à fonte solar, com redução de tributos federais PIS/Pasep e COFINS, também houve significativo avanço com a edição da Lei nº 13.169, de 2015, que determinou a sua cobrança sobre o consumo líquido das unidades consumidoras, redução de tributos sobre máquinas e equipamentos, e permissão para a injeção da energia sobressalente gerada à rede elétrica para consumo da própria unidade em até sessenta meses (BRASIL, 2015). Resultando em um grande crescimento do número

de unidades consumidoras com painéis fotovoltaicos a partir de 2014 (Nascimento, 2017).

Tais incentivos se demonstram importantes no crescimento das unidades consumidores devido ao alto custo de instalação dos módulos solares que pode ser justificado quando consideramos que a energia solar é limpa, renovável, silenciosa, há capacidade de aumentar a potência incorporando novos módulos, não consome combustível, possui vida útil superior a 20 anos, não há contaminação ambiental, é resistente (à granizo, vento, temperatura e umidade), possui capacidade de ser instalado em locais desprovidos da rede elétrica, e pela capacidade do país em ocupar grande destaque no cenário mundial de energia solar (Ferreira, 2014). Além disso, o retorno econômico do investimento feito pode ser alcançado em uma média de 5 a 7 anos, após esse período toda energia gerada é a custo zero (ABSOLAR, 2018).

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo foi avaliar o uso do sombreamento projetado por painéis fotovoltaicos para novilhas leiteiras manejadas a pasto através de suas respostas fisiológicas e comportamentais.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos foram:

- Quantificar o tempo gasto na projeção de sombra, fornecida por painéis fotovoltaicos, de acordo com a hora do dia por novilhas leiteiras.
- Quantificar as respostas comportamentais e fisiológicas de novilhas leiteiras a pasto em piquete com estruturas de sombra utilizando painéis fotovoltaicos.
- Medir a geração de energia elétrica por conversão de radiação solar através de painéis fotovoltaicos.

## 1.4 REFERÊNCIAS

Adeh EH, Selker JS, Higgins CW. **Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency.** PLoS ONE 13. doi:10.1371/journal.pone.0203256. 2018.

Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR). **Investimento em painéis solares ajuda a melhorar as operações no campo.** Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/investimento-em-paineis-solares-ajuda-a-melhorar-as-operacoes-no-campo.html>>. São Paulo, 2018.

Avendaño-Reyes L, Fuquay JW, Moore RB, Liu Z, Clark BL, Vierhout C. **Relationship between accumulated heat stress prepartum, body condition and postpartum performance in dairy cattle.** Journal of Applied Animal Research. 2009;35:33–8.

Balde Branco. **Alguns números do leite.** 13 de setembro de 2016. Disponível em: <<http://www.baldebranco.com.br/alguns-numeros-do-leite/>>

Bittar CMM. **Importância do acompanhamento do crescimento de novilhas de reposição.** Milkpoint. 2012. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/colunas/carla-bittar/importancia-do-acompanhamento-do-crescimento-de-novilhas-de-reposicao-80614n.aspx?r=533215516#>>. 2012

BRASIL. **Lei nº 13.169, de 6 de Outubro de 2015.** Brasília. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2015/lei-13169-6-outubro-2015-781720-publicacaooriginal-148365-pl.html>>. Out, 2015

Brouček J, Uhrinčat' M, Šoch M, Kišac P. **Genetics of behaviour in cattle.** Slovak Journal of Animal Science. 2008;41:166–72.

Brown-Brandl TM. **Understanding heat stress in beef cattle.** R Bras Zootec 47:. 8

Carvalho M, Xavier D, Alvim M, Aroeira L. **Sistemas Silvopastoris–Consórcio de Árvores e Pastagens.** Viçosa-MG, 128p. 2002.

Companhia Nacional de Abastecimento (Conab). **Boletim de Abril de 2017, Leite e derivados.** Disponível em:



[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17\\_05\\_15\\_14\\_13\\_38\\_leite\\_abril\\_2017.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_05_15_14_13_38_leite_abril_2017.pdf)

Conceição MN. **Avaliação da influência do sombreamento artificial no desenvolvimento de novilhas leiteiras em pastagens**. Tese (Doutorado em Agronomia). 138f. Universidade de São Paulo – Piracicaba. 2008.

Cunha D de NFV da, Campos OF de, Pereira JC, Pires M de FÁ, Lizieire RS, Martuscello JA. **Desempenho, variáveis fisiológicas e comportamento de bezerros mantidos em diferentes instalações: época chuvosa**. R Bras Zootec. 2007;36:1140–6.

Da Silva R, Maia AS. **Principles of Animal Biometeorology**. Dordrecht: Springer Netherlands; 2012.

Da Silva RG, Guilhermino MM, de Moraes DAEF. **Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture**. Int J Biometeorol. 2010;54:5–11.

Da Silva RG, Maia ASC, de Macedo Costa LL, de Queiroz JPAF. **Latent heat loss of dairy cows in an equatorial semi-arid environment**. Int J Biometeorol. 2012;56:927–32.

Da Silva RG. **Introdução à bioclimatologia animal**. Nobel; 2000.

Dickrell J. **Solar panels double as summer cow shades**. Dairy Herd Managment. Disponível em: <<https://www.dairyherd.com/article/solar-panels-double-summer-cow-shades>>. 2018.

EMBRAPA Gado de Leite. **Novilhas – Alimentação**. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/LeiteSudeste/alimentacao/novilha.html>>

EMBRAPA Gado de Leite. **Importância econômica**. Atualizado em 2002. Disponível em:<<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/LeiteCerrado/importancia.html>>.

EMBRAPA. **Anuário Leite 2019**. Atualizado em 2019. Disponível em: <[https://ainfo.cnptia.embrapa.br › bitstream › item › Anuario-LEITE-2019](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/bitstream/item/Anuario-LEITE-2019)>

Ferreira ADD. **Habitação autossuficiente interligação e integração de sistemas alternativos**. Rio de Janeiro: Interciência. 2014

Ferreira RM. **A baixa fertilidade de vacas Holandesas (*B. taurus*) repetidoras de serviço durante o estresse térmico está relacionada à sua baixa competência oocitária**. 141f. Tese (Pós- Doutorado em Reprodução Animal) – Universidade de São Paulo – São Paulo. 2012.

Howard F. **When will herd contraction begin?** Dairy Herd Management. Disponível em: < <http://digitaledition.qwinc.com/publication/?m=40917&i=474337&p=24>>. 2018.

Huber JT. **Alimentação de vacas de alta produção sob condições de estresse térmico**. Bovinocultura leiteira Piracicaba: FEALQ. 1990;33–48.

IDEAGRI. **A importância da idade ao primeiro parto para o sistema de produção de leite**. 2015. Disponível em: < <https://ideagri.com.br/posts/a-importancia-da-idade-ao-primeiro-parto-para-o-sistema-de-producao-de-leite>>. 2015

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário 2017**.Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/>>

Kovács L, Kézér FL, Bakony M, Jurkovich V, Szenci O. **Lying down frequency as a discomfort index in heat stressed Holstein bull calves**. Scientific Reports. 2018;8:15065.

Leira MH, Botelho HA, Barreto BB, Botelho JHV, Pessoa GO. **Fatores que alteram a produção e a qualidade do leite: Revisão**. PUBVET. 2018;12:172.

Maia ASC, Culhari E de A, Fonsêca V de FC, Milan HFM, Gebremedhin KG. **Photovoltaic panels as shading resources for livestock**. Journal of Cleaner Production. 2020;258:120551.

Maia ASC, daSilva RG, Battiston Loureiro CM. **Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment**. Int J Biometeorol.

2005;50:17–22.

Maia ASC, Gomes DaSilva R, Battiston Loureiro CM. **Respiratory heat loss of Holstein cows in a tropical environment.** Int J Biometeorol. 2005;49:332–6.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Boletim mensal de monitoramento do setor elétrico – junho de 2018.** Brasília: MME, 2018.

Monteiro APA, Tao S, Thompson IMT, Dahl GE. **In utero heat stress decreases calf survival and performance through the first lactation.** Journal of Dairy Science. 2016;99:8443–50.

Nääs I de A. **Princípios de conforto térmico na produção animal.** São Paulo: Ícone. 1989;183.

Nascimento RL. **Energia solar no Brasil: situação e perspectivas.** Camara dos Deputados Brasil, Tech Rep. 2017;

Nilforooshan MA, Edriss MA. **Effect of age at first calving on some productive and longevity traits in iranian holsteins of the isfahan province.** Journal of Dairy Science. 2004;87:2130–5.

Oliveira SEO, Costa CC de M, de Souza JBF, de Queiroz JPAF, Maia ASC, Costa LL de M. **Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating Holstein cows in an equatorial semi-arid environment.** Trop Anim Health Prod. 2014;46:1413–7.

Oliveira SEO, de Melo Costa CC, Chiquitelli Neto M, Dalla Costa FA, Maia ASC. **Effects of shade location and protection from direct solar radiation on the behavior of Holstein cows.** Int J Biometeorol. 2019;63:1465–74.

Pereira JCC. **Fundamentos de bioclimatologia aplicados à produção animal.** FEPMVZ; 2005.

Roelfeldt S. **You can't afford to ignore heat stress.** Dairy Herd Management. 1998;35:6–12.

Santos SGCG, Saraiva EP, Pimenta Filho EC, Gonzaga Neto S, Fonsêca VFC, Pinheiro A da C, et al. **The use of simple physiological and environmental measures to estimate the latent heat transfer in crossbred Holstein cows.** Int J Biometeorol. 2017;61:217–25.

Schütz KE, Rogers AR, Cox NR, Tucker CB. **Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behaviour, and body temperature.** Applied Animal Behaviour Science. 2009;116:28–34.

Schütz KE, Rogers AR, Poulouin YA, Cox NR, Tucker CB. **The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle.** Journal of Dairy Science. 2010;93:125–33.

Silanikove N. **Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants.** Livestock Production Science. 2000;67:1–18.

Tao S, Dahl G, Laporta J, Bernard J. 140 **Effects of heat stress during late gestation on the dam and its calf.** Journal of Animal Science. 2018;96:351–351.

Tao S, Rivas RMO. **Impact of heat stress on dairy calves.** Progressive dairy. Disponível em: <<https://www.progressivedairy.com/topics/calves-heifers/impact-of-heat-stress-on-dairy-calves>>. 2018

Torres Campos A, Klosowski ES, Gasparino E, Campos AT de, Santos WBR dos. **Análise térmica de abrigos individuais móveis e sombrite para bezerros.** Acta Sci Anim Sci. 2005;27:153–61.

Tucker CB, Rogers AR, Schütz KE. **Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system.** Applied Animal Behaviour Science. 2008;109:141–54.

Van laer E, Moons CPH, Sonck B, Tuytens FAM. **Importance of outdoor shelter for cattle in temperate climates.** Livestock Science. 2014;159:87–101.

West JW. **Effects of heat-stress on production in dairy cattle.** Journal of Dairy Science. 2003;86:2131–44.

Yousef MK. **Stress physiology in livestock**. Volume I. Basic principles. CRC press; 1985.

## **2 CAPÍTULO 2 – Photovoltaic panels as alternative shading to dairy heifers in grazing system<sup>§</sup>**

**A. F. P. A. Faria, <sup>1\*</sup> G. A. B. Moura, <sup>1</sup> C. C. M. Costa,<sup>1</sup> V. F. C. Fonsêca,<sup>1,2</sup> H. F. M. Milan,<sup>3</sup> and A. S. C. Maia<sup>1</sup>**

\* Corresponding author: [faria\\_af@hotmail.com](mailto:faria_af@hotmail.com)

<sup>1</sup>Innovation in Animal Biometeorology and Welfare (Inobio-Manera), São Paulo State University (Unesp), School of Agricultural and Veterinarian Sciences, Jaboticabal, Brasil, 14884-900

<sup>2</sup> Brain Function Research Group, School of Physiology, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa

<sup>3</sup> Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, United States of America

### **ABSTRACT**

The objective of this study was to evaluate the radiant heat load in the shadow projected by photovoltaic panels and to determine the impact on the physiological and behavioral responses of dairy heifers in the use of shade or not. For this purpose, seven crossbred 7/8 Holstein heifers were used, with an average age of 10 months, pastured in an inter-tropical environment. Body temperatures (vaginal, skin, hair coat surface temperatures, °C) and respiratory rate (breaths minutes<sup>-1</sup>) in the shade or exposed to the solar radiation were evaluated as physiological

<sup>§</sup>Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à Journal of Dairy Science e encontra-se em avaliação para publicação.

measures. Behavioral observations were made between 0800 and 1700h, in regular intervals of 5 minutes. Meteorological variables (air temperature and humidity, solar irradiance and wind speed) were measured in regular intervals of 1 minute. The shade structure consists of 10 photovoltaic panels, projecting 19.3 m<sup>2</sup> of shade, generating 429.51 kWh monthly average. In the first hour of the day, heifers spend 90% of their time exposed to solar radiation, standing in grazing activity. According to the increase in air temperature and solar radiation, they begin to use the shade, in rumination and idling activities, standing or lying until 1300h, totaling about 80% of the time in these activities. Vaginal temperature follows the daily oscillation of animals during the 24-hour period. Skin and hair coat surface temperatures reach the highest values when animals were exposed to the sun. The respiratory rate exhibits the same behavior of surface temperatures, and around 1400h reaching an average of 92 breaths minutes<sup>-1</sup>. The radiant heat load was about 27% lower under the shade structure, which shows that animals use shade because offer a better thermal comfort condition, controlling internal and surfaces temperatures and respiratory rate. Therefore, providing shade from photovoltaic panels aid thermoregulation of animals, improving their welfare and generating clean and renewable energy.

**Key words:** behavior, dairy heifer, photovoltaic panel, physiological, shade

## INTRODUCTION

There is a forecast that for the year 2050 the world population will be around 9.6 billion people (FAO, 2011). Consequently, the demand for animal products will increase, for instance it is estimated that the demand for milk and dairy products increase by 58% between 2010 and 2050 (FAO, 2011, FAO, 2013). This increase in consumption requires an increase in milk

production (FAO, 2013), mainly in tropical areas that, characterize extensive production systems in pasture and productivity per animal is considered low, having a growth potential due to investments in animal genetics, nutrition, management and ambience (Hernández-Castellano et al., 2019); being that, the tropical environment is characterized by high levels of solar radiation consequently, the dairy cow can obtain heat from direct solar radiation (daSilva et al., 2010), which can compromise its thermal comfort and welfare (Schütz et al., 2009; Karvatt et al., 2016) and its production of milk (West et al., 2003; Summer et al., 2018; Liu et al., 2019).

Oliveira et al., (2014 and 2019) indicated that Holstein cows managed in open pasture (Latitude 5° South) stopped grazing and looking for the shading when critical value of irradiance solar was around  $500 \text{ Wm}^{-2}$ , after  $800 \text{ Wm}^{-2}$  the animals spending above 80% of time in the shade. Shade is an excellent option to protect animals from solar radiation (Tucker et al., 2008; Schütz et al., 2009; Oliveira et al., 2014 and 2019) and as showed Oliveira et al. (2019) the cows prefer shade projected from surface that block 100% from direct solar radiation. In these conditions the animals spent about 60% of the time in the hottest hours of the day in the shadow projection that blocked 100% of the solar radiation and only 25% of the time in the one that blocked 30% of the radiation. Differently, from lactating cows, heifers, are generally managed in open pasture with excessive exposition the sunlight (Carvalho et al., 2003) that impact in their thermal comfort and welfare (Lopes et al., 2016). Some studies show that heifers when subjected to high radiation loads, being under thermal stress prior to the reproductive period, are more prone to gestational abortions, decreased gestation time, consequently there is less fetal weight gain and greater propensity to premature death and low quality and quantity of colostrum, as well as delaying the reproductive period (West, 2003a; Nilforooshan & Edriss, 2004; Avedaño-Reyes, 2009; Scavanez et al., 2018), generating losses for the productive system.



Shade has potential to rise thermal comfort and welfare of dairy heifers managed in hot environment and Maia et al., (2020) showed that it is possible the provision of shade and electric generation exploring the possibilities of agrivoltaic animal, with the use the photovoltaic panels for this purpose. The use of photovoltaic panels in the dairy cow breeding system is part of the gas mitigation strategies and the sustainable development objectives of the UN (United Nations) (UN, 2015). Incentives for the use of photovoltaic panels in agriculture have been growing worldwide, with lower costs and the development of technologies that increase the efficiency of energy conversion (Ferreira et al., 2018, Pereira & Souza, 2017; IRENA, 2017).

Recent studies show that this system of cogeneration of renewable energy and agricultural production promotes benefits for animals and the environment (Adeh et al., 2018, Neto et al., 2018), Maia et al. (2020) concluded that the use of photovoltaic panels as a shading resource for sheep generated electricity and reduced CO<sub>2</sub> emissions in the atmosphere, offering better thermal comfort for these animals than the shade cloth, therefore being a viable and sustainable option to improve thermoregulation and the welfare of these animals.

Therefore, there is a gap in the literature when referring to this subject. In addition, the following questions arise: i. What radiant thermal environment do animals experience in the shade of photovoltaic panels? ii. What is the influence of the use of this shadow on the animals' thermoregulation? iii. What is its influence on the sustainability of the breeding system? Therefore, this study aimed to evaluate the radiant thermal microclimate in the shade projected by photovoltaic panels and determine its impact on the behavioral and physiological responses of Holstein heifers, as well as to quantify the generation of electricity and the reduction of CO<sub>2</sub> emissions by photovoltaic panels.

## MATERIALS AND METHODS

### *Animals and collected data*

Animal procedures were approved by the Animal Ethics Committee of the São Paulo State University (013070/2018). Seven crossbred 7/8 Holstein heifers with a mean live body mass of 242 kg (SD=53.5) and age of 10 months (SD=9.5) were assessed for monitoring of their behavioral and bio-thermal responses during nineteen days, from April 2nd to 20th, 2019. The animals were kept in a paddock (area of 1.900 m<sup>2</sup>) at the Bioclimatology Laboratory at Sao Paulo State University, Brazil (21°15'17'' South latitude, 48°19'20'' West longitude), with access to an artificial shade, *ad libitum* water, and *Cynodongrass*. The shade structure (Figure 1; lower height: 3.0 m; inclination angle: 15°; width: 4.0 m; length: 5.0 m; area: 20 m<sup>2</sup>; projected shade area: 19.3 m<sup>2</sup>; shade area per animal: 2.76 m<sup>2</sup> animal<sup>-1</sup>) consisted of ten photovoltaic panels (1.0 m × 2.0 m each; 335 Wp, peak efficiency of 16.72%, Canadian Solar model CS6U-335P, Guelph, ON; installed by Blue Sol, Blue Sol Energia Solar, Ribeirão Preto, SP). The heifers received a daily supplement at 1730h, wich consisted of corn silage and concentrate diet (76% corn, 7% soybean, 8% wheat bran, 5% cottonseed meal, 3% mineral core and 1% dicalcium phosphate) in the proportion of 70:30. Dry matter intake for consumption was 2% of body weight.

### *Environmental measurements*

Meteorological variables were continuously recorded every 1 min, throughout 24 hours using a weather station (Campbell Scientific CR10X Model, Logan, UT) placed next to the experimental paddock. The measured meteorological variables were air temperature (T<sub>A</sub>, °C; accuracy ± 0.5 °C; range: -35 to 50 °C); relative humidity (R<sub>H</sub>, %; accuracy ± 3%; range: 0 and 100%); black globe temperature in the sun (T<sub>G</sub>, °C; accuracy ± 0.1 °C); wind velocity (U, m s<sup>-1</sup>

<sup>1</sup>; accuracy  $\pm 0.44$ ) and direction ( $U_d$ , degrees; accuracy of  $\pm 3\%$ ; range  $0^\circ$  to  $360^\circ$  degrees); solar irradiance ( $R_s$ ,  $W\ m^{-2}$ ; CMP-22, Kipp and Zonen, Delft, Netherlands; spectral range:  $0.3 - 3.6\ \mu m$ ), and ultraviolet solar irradiance ( $R_{UV}$ ,  $W\ m^{-2}$ ; spectral range:  $0.28 - 0.4\ \mu m$ ). Also was determined using the measures temperature of the inner side of solar panels (not exposed to the solar radiation; measured using 5 iButtons DS1921; accuracy  $\pm 0.5\ ^\circ C$ ; Maxim Integrate, San Jose, CA; measured every five minutes) was also measured.

### ***Body temperatures and respiratory rate***

Body temperatures were continuously recorded every five minutes during 2400h. The following physiological temperatures were recorded: vaginal ( $T_v$ ,  $^\circ C$ ; Star-Oddi® intravaginal thermometer; Reykjavik, Iceland, DST centi-T, accuracy  $\pm 0.1\ ^\circ C$ , range:  $5$  to  $45^\circ C$ ), inserted with the aid of a vaginal speculum and an adapted applicator; skin temperature ( $T_{SKIN}$ ,  $^\circ C$ ; iButton DS1921; Maxim Integrate, San Jose, CA, accuracy  $\pm 0.5\ ^\circ C$  and range  $-40$  to  $85\ ^\circ C$ ) and hair coat surface temperature ( $T_s$ ,  $^\circ C$ ; iButton DS1921; Maxim Integrate, San Jose, CA, accuracy  $\pm 0.5\ ^\circ C$  and range  $-40$  to  $85\ ^\circ C$ ) fixed to the animal's body surface (posterior region of the scapula) with nontoxic glue and covered with a mosquito net. Respiratory rate ( $R_R$ , breath  $min^{-1}$ ) was recorded every 30 min through measuring the time interval for 10 respiratory movements during 0800 to 1700h.  $R_R$  was not measured when the animal was grazing because the movement of the animal interfered with the measurement. Mean inter-observer agreement reliability for respiratory rate was between 98 and 100%.

The sensors used to measure vaginal temperature were fixed to the animals before the beginning of the behavioral evaluation period and removed for data extraction after the end of behavioral data collection. The surface temperature sensors were fixed in the heifers at the beginning of the behavioral observation period and due to storage memory, the sensors were

removed every seven days for data extraction and then replaced in the animals. This procedure was repeated until the end of the behavioral data collection period.

### ***Behavioral evaluation***

The animals had characteristics that differentiated them and could be identified visually, were classified from one to seven according to date of birth, from oldest to youngest. Inter-observer agreement reliability for the scan observations was 100% for all behaviors.

Using the instantaneous scan sampling method (Martin and Bateson, 2007), Behavioral variables were recorded as posture (standing or lying down), position (under the sun or shade of the panels) and activities (grazing, ruminating, idling) every five-minute from 0800 to 1700 h. Lying was recorded when the animal was in sternal or lateral decubitus, otherwise standing was recorded; in the shade of the panel was recorded when the surface temperature sensors were under the shade, otherwise under the sun was recorded; grazing was recorded when the animal was eating and/or looking for food, ruminating was recorded when chewing movements without ingestion were observed, otherwise idling was recorded.

### ***Thermal comfort evaluation***

For thermal comfort evaluation of the shadow structure, data collection was made after the behavioral evaluation period, so that there was no interference in the behavioral data. It was 10 consecutive days of collection from 0800 to 1700h, using the black globe temperature under the shade of the panels ( $T_{GS}$ , °C; accuracy  $\pm 0.1$  °C), measured at regular one-minute intervals; temperature of five iButton® datalogger on the underside of the panels (°C; accuracy of  $\pm 0.5$  °C; range between -40 to 85 ° C, Maxim Integrate, San Jose, CA,) at regular intervals of 5 minutes, the dataloggers were fixed in the center of the panels each one and a half meters away with two dataloggers on the upper panels and three dataloggers on the lower panels; and the

meteorological variables (air temperature, relative humidity, black globe temperature in the sun, wind velocity and direction, solar irradiance and ultraviolet solar irradiance) that were recorded throughout 24 hours using the same weather station (Campbell Scientific CR10X Model, Logan, UT), placed next to the experimental paddock.

The evaluation of the thermal comfort of animals in the shadow projection of panels structure, the concept of Radiant Heat Load (RHL) was used (Silva & Maia, 2012) where:

$$\text{RHL} = \sigma (T_{\text{MR}})^4$$

where,  $\sigma$  constant Stefan-Boltzman  $5.67 \times 10^{-8}$  ( $\text{W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ); The Mean Radiant Temperature ( $T_{\text{MR}}$ , K) was estimated from the black globe temperature by the equation proposed by Silva (2000).

#### ***Electricity generation and CO<sub>2</sub> savings by photovoltaic panels***

Between the period of September/2018 and August/2019 the electricity generated by the photovoltaic panels was recorded every 5 min by the frequency inverter (Fronius 3kWp). The amount of CO<sub>2</sub> saving to the atmosphere because of electricity generated by the photovoltaic panels was calculated using the 2018 and 2019 daily Brazilian CO<sub>2</sub> emission factor for electric energy generation (hydroelectric, wind, photovoltaic, and thermal; MCTIC, 2018; MCTIC, 2019), according to the month of the respective year.

#### ***Statistical Analysis***

The data were analyzed using the least squares method (Harvey, 1960), using procedure generalized mixed model (Proc Mixed) of the SAS Institute V.8. The linear model was described as follow:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + D_j + A_k + H(B)_{li} + e_{ijkl}$$

where,  $Y_{ijkl}$  is the animal response variable observed in the  $i$ -th environment, on the  $j$ -th day of evaluation, on the  $k$ -th animal, in the  $l$ -th hour class; B is the random effect of the  $i$ -th environment ( $i$  = sun and shade); D is the random effect of the  $j$ -th evaluation day ( $j$  = 1, 2, 3 ..., 15); A is the random effect of the  $k$ -th animal (1, 2, 3, ..., 7); H (B) is the fixed effect of the interaction of the  $l$ -th hour class with the  $i$ -th environment (if  $i$  = 1, then  $l$  = 8, 9, ..., 17; if  $i$  = 2, then  $l$  = 7, 8, ..., 17);  $e_{ijkl}$  is the random error and  $\mu$  the parametric mean.

Principal components analysis was used to obtain an environmental index for prediction of time spent under shade, following DaSilva et al. (2015). This analysis was performed using meteorological data ( $T_A$ ,  $R_H$ ,  $T_G$ ,  $U$ ,  $R_S$ ,  $R_{UV}$  and  $T_{MR}$ ). The first component explained 97.54% of the total variation in the seven meteorological variables. The components were as follows:

$$Z_1 = 0.3789(T_A) - 0.3801(R_H) + 0.3805(T_G) + 0.3811(T_{MR}) + 0.3739(R_S) + 0.3737(R_{UV}) + 0.3772(U)$$

$$Z_2 = Z_1^2$$

Where the values of  $T_A$ ,  $R_H$ ,  $T_G$ ,  $U$ ,  $R_S$ ,  $R_{UV}$  and  $T_{MR}$  are standardized as

$$\left[ x = \left( x_i - \bar{x} / \sigma_x \right) \right].$$

## RESULTS

### *Meteorological variables and thermal comfort evaluation*

Solar irradiance and wind speed followed similarly pattern during the day: started to increase at 0700h, peaked at 1100 and 1200h, respectively, presented above values of 1,000 W m<sup>-2</sup> and 3.32 m s<sup>-1</sup> (Table 1), and decreased to minimum values 1700h (Figure 2A). On the other hand, air temperature and relative humidity showed inverse patterns (Figure 2B). Air

temperature variation was of 12.52 °C and 32.89 °C (Table 1), with maximum around 1200h and minimum around 0700h.

Radiant heat load (RHL) in the sun maximum was aboveobserved as 800 W m<sup>-2</sup> while the value in the shade of photovoltaic panels was ~27% lower (Table 1) and increased constantly throughout the day (Figure 3).

Figure 4B demonstrates that the surface temperature of the panels is close to the values of black globe temperature exposed to the sun, as well as the temperature of the black globe under the shadow structure of the panels is close to the air temperature value, demonstrating that the surface temperature of the panels does not impact the temperature of the black globe under the shadow structure and that, all temperatures and radiant heat load are influenced by the levels of solar irradiance and ultraviolet radiation (Figure 4A).

### ***Behavioral responses***

Table 2 shows the frequency of the behavioral responses. Behaviors that showed frequency less than 5% of the time were disregarded, as they are not significant behavioral responses ( $P < 0.05$ ). Therefore, being exposed to sun was the combination of standing and grazing (44.19%) and in the shade were the combinations of standing or lying down in ruminating activity (5.19 and 15.31% respectively) and standing or lying down in idling activity (11.23 and 15.54% respectively).

During early morning, heifers spent about 90% of the time under the sun (Figure 5A). From around 0900 and 1000h, they spent about 60% of the time in the shade of the panels developing the activities of idleness or ruminating, standing or lying. Lying posture was predominant in the use of shadow between 1000 and 1300h, which together represent about 60% of this time of shadow use, about twice as persistent as other behaviors when animals were

standing (Figure 5C). After 1300h, animals returned to graze under the sun (Figure 5A and 5B) increasing from 30 to 70% at 1700h.

### ***Body temperatures and respiratory rate***

Vaginal temperature followed a daily rhythm, increasing from 0800h (minimum of 38.7 °C) to 1600h (maximum of 39.9 °C), independently if animals were in the shade or exposed to the sun (Figure 6A;  $P < 0.05$ ).

Skin (Figure 6C) and hair-coat (Figure 6D) surface temperatures followed a similar daily rhythm. Differently from vaginal temperatures, surface temperatures were at least 1° C higher (from 0900h to 1700h;  $P < 0.05$ ) for animals under the sun, reaching 3.5°C and 5°C for skin and hair-coat surface temperatures, respectively.

Respiration rate increased throughout the day and showed signs of decrease after 1400h with a difference of  $\pm 5$  breaths  $\text{min}^{-1}$  with the animals in the shade in relation to the sun between 1000 and 1400h (Figure 6B).

### ***Electricity generation and CO<sub>2</sub> savings by photovoltaic panels***

The electrical energy generated and the amount of CO<sub>2</sub> not emitted to the atmosphere is shown in the Figure 7. In the period of one year, the shading structure by photovoltaic panels generated 4869.4 kWh and reduced CO<sub>2</sub> emissions by 2.32ton into the atmosphere.

### ***Index of Shade Time (IST)***

The need for shade in dairy heifers can be predicted from an index that considers meteorological conditions, namely, the index of shade time (IST). The best regression equation estimates of time spent in the shade were as follows:

$$\text{IST} = 36.8489 + 8.8901 (Z_1) + 1.3228 (Z_2)$$



or

$$IST = 748.7795 - 18.6280 (T_A) - 3.2744 (R_H) + 0.1048 (R_S) - 32.2071 (U);$$

each yielding an  $R^2$  value of 0.83 and 0.97, respectively.

## DISCUSSION

The high radiant heat load environment (marked by high air temperatures and solar irradiance) provided an uncomfortable thermal environment. To ameliorate this uncomfortable thermal environment, animals sought the shade from the photovoltaic panels, which blocks 100% of direct solar radiation (Oliveira et al., 2019) and reduced radiant heat load by 27% and then chose to use this feature spending about 90% of the time using it. The proximity of the black globe temperature values under the shade structure to the air temperature shows the reason why the radiant heat load under the structure is lower, even if the surface temperature of the panels is high, due to the height of the panel shade structure heat is dissipated by the environment and does not affect animals. In the shade, animals spent most of the time lying down (either ruminating or idling), which indicates thermal comfort. Adding to the activities of idleness and rumination, the animals under the shade spent most of their time lying down, totalling about 60%, showing that the shade provided thermal comfort (Zähner et al., 2004; Giro et al., 2019).

The results of the present study show that heifers used the shade of the panels as a resource in an attempt to thermoregulate in this high radiant heat load environment and that cogeneration of clean electric energy demonstrates the sustainability of the resource, which contributes to a lower emission of gases in the environment (Figure 7). Similar to the findings by Maia et al. (2020) assuming that the price of electricity is currently 0.78 R\$/kWh, and the

total cost of the panels is around R\$ 23,000.00, there is an annual savings of R\$ 3,798.13 for using the structure of photovoltaic panels as shading for heifers. The time for economic return on the investment made is six years, being less than the 10 to 15 economic return found by Dickrell (2018) in Minnesota (USA), who states however that without federal tax incentives the return is up to 20 years. There is also the possibility of injecting the electricity generated back into the consumption network, and then the spare energy can be used in other places.

Previous studies showed that heat stress can influence animal behavior, physiological responses (Schütz et al., 2010), and decrease milk production and quality (Joksimović-Todorović et al., 2011; Pragna et al., 2017; Summer et al., 2018). Allen et al. (2015) studied the effects of body temperature on the behavioral patterns of this heat-stressed animal category and found that changes in body temperatures in the temperature and humidity index influence the behavior of animals standing or lying and that animals pass higher part of the time lying when they are in thermal comfort, corroborating the results of Cook et al. (2007). Although heifers are few studied in animal production because there is no direct result as in the case of lactating cows there is milk production. Even if heifers have larger surface area in relation to body mass and suffer less from stress when this category of animals does not undergo thermal stress and can thermoregulate, there is improvement in growth, greater weight and size, as well as lower chances of abortion and better rates at first calving, with heavier calves and better colostrum quality (West, 2003b; Scanavez et al., 2018). Validating the importance of studies that can understand the behavior and physiology of these animals in challenging thermal environments.

The considerable percentage of time the heifers spend under the shade of the panels reinforces the findings of Oliveira et al. (2019) that the higher the level of solar irradiance blockade the longer the time spent in the shade, and the environmental factors influence the use of shade (Schütz et al., 2008). Similar to the findings by Oliveira et al. (2019) and according to

the IST found, the animals start to use the shade of the panels more when the irradiance levels exceed  $500 \text{ Wm}^{-2}$  and even use the shading feature up to 80% of the time when the irradiance levels reach  $900 \text{ Wm}^{-2}$ , reinforcing what daSilva et al. (2015) classifies it as levels of animal discomfort, and shading must be provided to improve the conditions of thermal comfort and welfare for the animals. Therefore, they spend most of their time standing, decreasing walking activities in an attempt to cool, increasing the surface contact area to improve skin evaporation losses, and longwave radiation and convection losses (Cook et al., 2007; Allen et al., 2015; Polsky & Keyserlingk, 2017).

The use of shade was also important for animals in relation to physiological parameters. When Hillman et al. (2005) studied established Holstein cows using fans and sprinkles, experimental group or not, control group, noted that cows kept their internal body temperature constant in both situations. Nascimento et al. (2019) studied in Jersey cows the influence of the tropical environment on the animals' rectal and skin temperatures and found similar results. However, dorsal temperatures and respiratory rate were higher in the control group studied by Hillman et al. (2005), demonstrating that internal temperature is a physiological stimulus that initiates permanence to seek cooling. It can be seen from our results obtained that regardless of being exposed to the sun or under the shade of the panels the vaginal temperature of the heifers remained in a pattern. This behavior of the internal temperature is related to the thermoregulation of the animals, demonstrating that the animals controlled their temperature using the shade as a thermoregulatory resource.

Similar behavior occurs with animal surface temperatures and respiratory rate, where there is a point of maximum values and when aligned with animal behavior patterns we can see that animals use the shade of the panels so that these values do not exceed and that they can then enjoy better thermal comfort conditions. Domingos et al. (2013) when comparing cows

that used shading combined or not with water sprinkling compared to cows exposed to direct solar radiation found similar results, that shading helps animals to reduce the values of physiological variables, causing body temperatures, of surface as well as the respiratory rate do not exceed values that cause discomfort to the animals, the use of the shade is to help in the thermoregulation process. When the thermal environment is challenging, the main route of heat loss is evaporative and respiratory losses contribute significantly to this heat loss (Maia et al., 2005).

Previous theoretical studies have investigated the potential of photovoltaic panels to offer a cooler microclimate to livestock (Adeh et al., 2018; Neto et al., 2018, Maia et al., 2020). The limitation of these studies was to only consider the reduction in air temperature provided by shading structures. In regions with high radiant heat load (e.g., tropical and inter-tropical regions), the effects of air temperature on livestock heat stress might be less important than the effects of solar radiation (DaSilva et al., 2012; Mitchell et al., 2018). The present study used a radiant heat load index, which considers the thermal radiant environment within the shade projected by the photovoltaic panels promoting animal welfare. These results point that animals use the shade structure of the photovoltaic panels because it is thermally comfortable and contribute to their thermoregulation. As the heifers spend most of their time in the shade of lying panels, it is understood that they find thermal comfort under the shade structure of the panels (Zähner et al., 2004; Kovács et al., 2018), including performing idling activities and rumination.

## CONCLUSION

Heifers sought the shade from the photovoltaic panels when air temperature and solar irradiance were high (resulting in high radiant heat load). The shade from the panels provided a thermal comfortable microclimate for the animals, which lied down more when in the shade. Therefore, the shade structure of the photovoltaic panels proved to be efficient as a shade resource and cogeneration of clean and renewable electricity, promoting the welfare of animals and better conditions for thermoregulation.

### **ACKNOWLEDGMENTS**

The authors gratefully acknowledge CAPES (Higher Education Personnel Improvement Coordination) for granting the scholarship throughout the work. Also to Professor Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, director of UNESP – Jaboticabal Campus, and to FAPESP (São Paulo Research Foundation – process number: 2014/09639-7 and 2011/17388-6) for all technical support. As well as to the Dairy Cattle Sector of UNESP - Jaboticabal Campus for the availability of animals for the experimental period.

### **REFERENCES**

- Adeh, E.H., J.S. Selker, and C.W. Higgins. 2018. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. PLoS ONE 13. doi:10.1371/journal.pone.0203256.
- Allen, J.D., L.W. Hall, R.J. Collier, and J.F. Smith. 2015. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. Journal of Dairy Science 98:118–127.

doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2013-7704>.

- Avendaño-Reyes, L., J.W. Fuquay, R.B. Moore, Z. Liu, B.L. Clark, and C. Vierhout. 2009. Relationship Between Accumulated Heat Stress Prepartum, Body Condition and Postpartum Performance in Dairy Cattle. *Journal of Applied Animal Research* 35:33–38. doi:[10.1080/09712119.2009.9706980](https://doi.org/10.1080/09712119.2009.9706980).
- Carvalho, L.B., and H. de A. Villaça. Comunicado 35 Técnico ISSN 1678-3131 Juiz de Fora, MG Dezembro, 2003 4.
- Cook, N.B., R.L. Mentink, T.B. Bennett, and K. Burgi. 2007. The Effect of Heat Stress and Lameness on Time Budgets of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 90:1674–1682. doi:[10.3168/jds.2006-634](https://doi.org/10.3168/jds.2006-634).
- Da Silva, R., and A.S. Maia. 2012. *Principles of Animal Biometeorology*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Da Silva, R.G. 2000. *Introdução à Bioclimatologia Animal*. Nobel.
- Da Silva, R.G., M.M. Guilhermino, and D.A.E.F. de Moraes. 2010. Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture. *Int J Biometeorol* 54:5–11. doi:[10.1007/s00484-009-0244-1](https://doi.org/10.1007/s00484-009-0244-1).
- Da Silva, R.G., A.S.C. Maia, and L.L. de Macedo Costa. 2015. Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments. *Int J Biometeorol* 59:551–559. doi:[10.1007/s00484-014-0868-7](https://doi.org/10.1007/s00484-014-0868-7).
- Da Silva, R.G., A.S.C. Maia, L.L. de Macedo Costa, and J.P.A.F. de Queiroz. 2012. Latent heat loss of dairy cows in an equatorial semi-arid environment. *Int J Biometeorol* 56:927–932. doi:[10.1007/s00484-011-0501-y](https://doi.org/10.1007/s00484-011-0501-y).

Dickrell, J. 2018. Solar Panels Double as Summer Cow Shades. Accessed April 13, 2020.

<https://www.dairyherd.com/article/solar-panels-double-summer-cow-shades>.

Domingos, H.G.T., A.S.C. Maia, J.B.F. Souza, R.B. Silva, F.M.C. Vieira, and R.G. Silva. 2013.

Effect of shade and water sprinkling on physiological responses and milk yields of Holstein cows in a semi-arid region. *Livestock Science* 154:169–174.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2013.02.024>.

FAO. 2011. World Livestock 2011 – Livestock in food security. Rome

FAO. 2013. Optimization of feed use efficiency in ruminant production systems – Proceedings of the FAO Symposium, 27 November 2012, Bangkok, Thailand, by Harinder P.S. Makkar and David Beeve, eds. FAO Animal Production and Health Proceedings, No. 16. Rome, FAO and Asian-Australasian Association of Animal Production Societies.

Ferreira, A., S.S. Kunh, K.C. Fagnani, T.A. De Souza, C. Tonezer, G.R. Dos Santos, and C.H.

Coimbra-Araújo. 2018. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81:181–191.  
doi:[10.1016/j.rser.2017.06.102](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.102).

Giro, A., J.R.M. Pezzopane, W.B. Junior, A. de F. Pedroso, A.P. Lemes, D. Botta, N.

Romanello, A. do N. Barreto, and A.R. Garcia. 2019. Behavior and body surface temperature of beef cattle in integrated crop-livestock systems with or without tree shading. *Science of The Total Environment* 684:587–596.  
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.377>.

Harvey, W.R. 1960. Least-Squares Analysis of Data with Unequal Subclass Numbers.

Agricultural Research Service, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

- Hernández-Castellano, L.E., J.E. Nally, J. Lindahl, M. Wanapat, I.A. Alhidary, D. Fanguero, D. Grace, M. Ratto, J.C. Bambou, and A.M. de Almeida. 2019. Dairy science and health in the tropics: challenges and opportunities for the next decades. *Trop Anim Health Prod* 51:1009–1017. doi:10.1007/s11250-019-01866-6.
- Hillman, P.E., C. N. Lee, and S. T. Willard. 2005. Thermoregulatory responses associated with lying and standing in heat-stressed dairy cows. *Transactions of the ASAE* 48:795–801. doi:10.13031/2013.18322.
- IRENA [International Renewable Energy Agency], 2017. Solar energy. <https://www.irena.org/solar>. Accessed on 20 March 2020.
- Joksimovic-Todorovic, M., V. Davidovic, S. Hristov, and B. Stankovic. 2011. Effect of heat stress on milk production in dairy cows. *Bio Anim Husb* 27:1017–1023. doi:10.2298/BAH1103017J.
- Karvatte, N., E.S. Klosowski, R.G. de Almeida, E.E. Mesquita, C.C. de Oliveira, and F.V. Alves. 2016. Shading effect on microclimate and thermal comfort indexes in integrated crop-livestock-forest systems in the Brazilian Midwest. *International Journal of Biometeorology* 60:1933–1941. doi:10.1007/s00484-016-1180-5.
- Liu, J., L. Li, X. Chen, Y. Lu, and D. Wang. 2019. Effects of heat stress on body temperature, milk production, and reproduction in dairy cows: a novel idea for monitoring and evaluation of heat stress — A review. *Asian-Australas J Anim Sci* 32:1332–1339. doi:10.5713/ajas.18.0743.
- Lopes, L.B., C. Eckstein, D.S. Pina, and R.A. Carnevalli. 2016. The influence of trees on the thermal environment and behaviour of grazing heifers in Brazilian Midwest. *Trop Anim*



Health Prod 48:755–761. doi:10.1007/s11250-016-1021-x.

Maia, A.S.C., E. de A. Culhari, V. de F.C. Fonsêca, H.F.M. Milan, and K.G. Gebremedhin. 2020. Photovoltaic panels as shading resources for livestock. *Journal of Cleaner Production* 258:120551. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120551.

Maia, A.S.C., R.G. daSilva, and C.M. Battiston Loureiro. 2005a. Sensible and latent heat loss from the body surface of Holstein cows in a tropical environment. *Int J Biometeorol* 50:17–22. doi:10.1007/s00484-005-0267-1.

Maia, A.S.C., R. Gomes DaSilva, and C.M. Battiston Loureiro. 2005b. Respiratory heat loss of Holstein cows in a tropical environment. *Int J Biometeorol* 49:332–336. doi:10.1007/s00484-004-0244-0.

Martin, P., and P. Bateson. 2007. *Measuring Behaviour: An Introductory Guide*. Cambridge University Press.

MCTIC, 2018. Brazilian Ministry of Science, Technology, Innovation and Communication. CO2 emission factors for the generation of electrical energy in the Brazilian national interconnected system. [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SPEED/clima/textogeral/emissao\\_despacho.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SPEED/clima/textogeral/emissao_despacho.html). Accessed on 20 March 2020.

MCTIC, 2019. Brazilian Ministry of Science, Technology, Innovation and Communication. CO2 emission factors for the generation of electrical energy in the Brazilian national interconnected system. [https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SPEED/clima/textogeral/emissao\\_despacho.html](https://www.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SPEED/clima/textogeral/emissao_despacho.html). Accessed on 20 March 2020.

- Mitchell, D., E.P. Snelling, R.S. Hetem, S.K. Maloney, W.M. Strauss, and A. Fuller. 2018. Revisiting concepts of thermal physiology: Predicting responses of mammals to climate change. *J Anim Ecol* 87:956–973. doi:10.1111/1365-2656.12818.
- Nascimento, S.T., A.S.C. Maia, V. de França Carvalho Fonsêca, C.C.N. Nascimento, M.D. de Carvalho, and M. da Graça Pinheiro. 2019. Physiological responses and thermal equilibrium of Jersey dairy cows in tropical environment. *Int J Biometeorol* 63:1487–1496. doi:10.1007/s00484-019-01734-w.
- Neto, R. de C.S., I.I. Berchin, M. Magtoto, S. Berchin, W.G. Xavier, and J.B.S.O. de A. Guerra. 2018. An integrative approach for the water-energy-food nexus in beef cattle production: A simulation of the proposed model to Brazil. *Journal of Cleaner Production* 204:1108–1123. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.200.
- Nilforooshan, M.A., and M.A. Edriss. 2004. Effect of Age at First Calving on Some Productive and Longevity Traits in Iranian Holsteins of the Isfahan Province. *Journal of Dairy Science* 87:2130–2135. doi:10.3168/jds.S0022-0302(04)70032-6.
- Oliveira, S.E.O., C.C. de M. Costa, J.B.F. de Souza, J.P.A.F. de Queiroz, A.S.C. Maia, and L.L. de M. Costa. 2014. Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating Holstein cows in an equatorial semi-arid environment. *Trop Anim Health Prod* 46:1413–1417. doi:10.1007/s11250-014-0657-7.
- Oliveira, S.E.O., C.C. de Melo Costa, M. Chiquitelli Neto, F.A. Dalla Costa, and A.S.C. Maia. 2019. Effects of shade location and protection from direct solar radiation on the behavior of Holstein cows. *Int J Biometeorol* 63:1465–1474. doi:10.1007/s00484-019-01747-5.
- Pereira, S.V., and J.G. Souza . 2017. *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, second ed. Inpe São

José dos Campos.

- Polsky, L., and M.A.G. von Keyserlingk. 2017. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science* 100:8645–8657. doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>.
- Pragna, P., P.R. Archana, J. Aleena, V. Sejian, G. Krishnan, M. Bagath, A. Manimaran, V. Beena, E.K. Kurien, G. Varma, and R. Bhatta. 2017. Heat Stress and Dairy Cow: Impact on Both Milk Yield and Composition. *International J. of Dairy Science* 12:1–11. doi:10.3923/ijds.2017.1.11.
- Scanavez, A.L.A., B. Fragomeni, and L.G.D. Mendonça. 2018. Animal factors associated with core body temperature of nonlactating dairy cows during summer<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science* 96:5000–5009. doi:10.1093/jas/sky353.
- Schütz, K.E., N.R. Cox, and L.R. Matthews. 2008. How important is shade to dairy cattle? Choice between shade or lying following different levels of lying deprivation. *Applied Animal Behaviour Science* 114:307–318. doi:10.1016/j.applanim.2008.04.001.
- Schütz, K.E., A.R. Rogers, N.R. Cox, and C.B. Tucker. 2009. Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behaviour, and body temperature. *Applied Animal Behaviour Science* 116:28–34. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applanim.2008.07.005>.
- Schütz, K.E., A.R. Rogers, Y.A. Poulouin, N.R. Cox, and C.B. Tucker. 2010. The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 93:125–133. doi:10.3168/jds.2009-2416.

- Summer, A., I. Lora, P. Formaggioni, and F. Gottardo. 2018. Impact of heat stress on milk and meat production. *Animal Frontiers* 9:39–46. doi:10.1093/af/vfy026.
- Tucker, C.B., A.R. Rogers, and K.E. Schütz. 2008. Effect of solar radiation on dairy cattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Applied Animal Behaviour Science* 109:141–154. doi:10.1016/j.applanim.2007.03.015.
- West, J.W. 2003a. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* 86:2131–2144. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X.
- West, J.W., B.G. Mullinix, and J.K. Bernard. 2003b. Effects of Hot, Humid Weather on Milk Temperature, Dry Matter Intake, and Milk Yield of Lactating Dairy Cows. *Journal of Dairy Science* 86:232–242. doi:10.3168/jds.S0022-0302(03)73602-9.
- Zähner, M., L. Schrader, R. Hauser, M. Keck, W. Langhans, and B. Wechsler. 2004. The influence of climatic conditions on physiological and behavioural parameters in dairy cows kept in open stables. *Anim. Sci.* 78:139–147. doi:10.1017/S1357729800053923.

## TABLES AND FIGURES

**Table 1** – Mean and range values of meteorological variables during the observation period (0800 to 1700 h) and over 24h

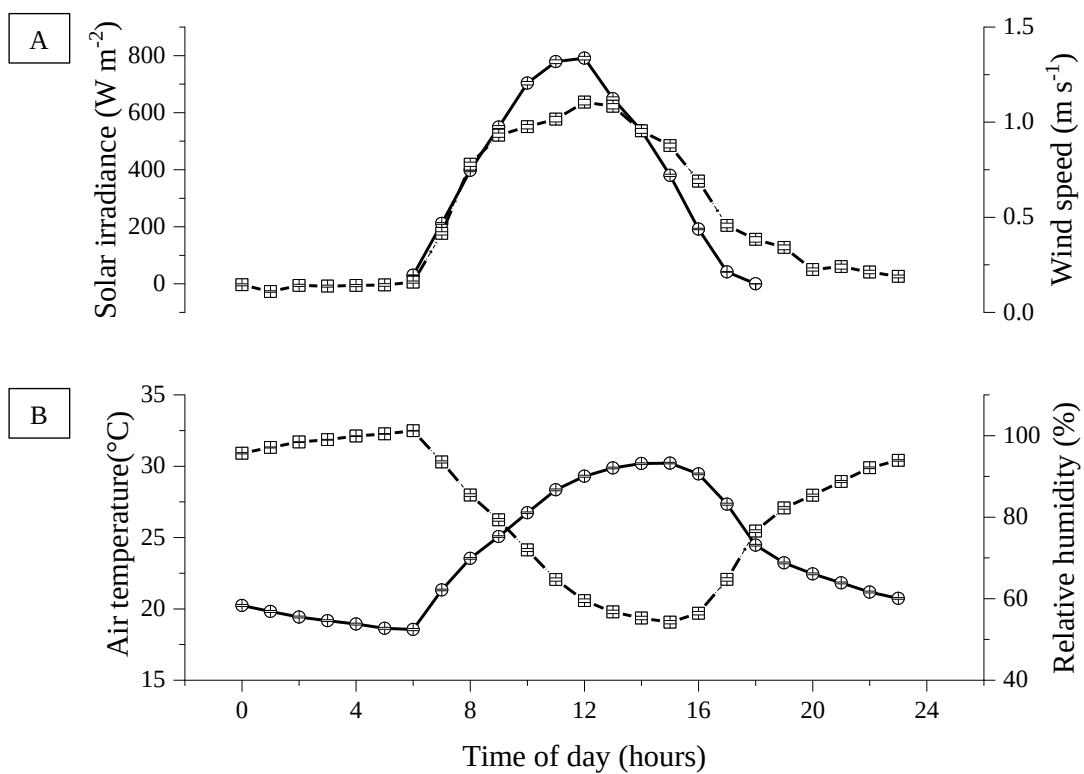
| Meteorological variable               | 24 h   |                 | 0800 to 1700 h |                  |
|---------------------------------------|--------|-----------------|----------------|------------------|
|                                       | Mean   | Range           | Mean           | Range            |
| Air temperature (°C)                  | 23.75  | 12.37 – 32.89   | 28.02          | 20.37 – 32.89    |
| Solar irradiance (W m <sup>-2</sup> ) | 219.28 | 0 – 1,100.20    | 553.23         | 24.51 – 1,100.20 |
| Relative humidity (%)                 | 81.36  | 35.80 – 100.00  | 64.85          | 35.80 – 100.00   |
| Wind speed (m s <sup>-1</sup> )       | 0.49   | 0 – 3.32        | 0.94           | 0 – 3.32         |
| RHL sun (W m <sup>-2</sup> )          | 516.65 | 372.17 – 806.77 | 651.39         | 433.62 – 806.77  |
| RHL panels (W m <sup>-2</sup> )       | NA     | NA              | 475.81         | 390.36 – 637.28  |

<sup>1</sup>NA = not applicable**Table 2** – Percentages of time frequencies spent on possible combinations of behavioral activities

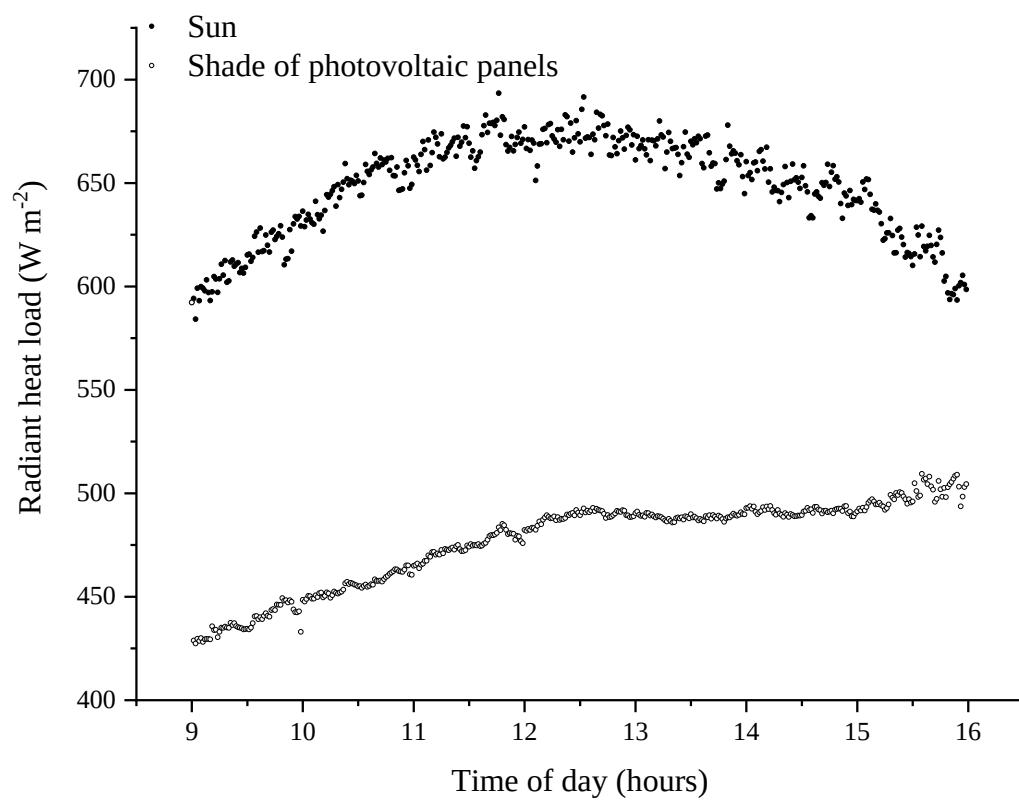
| Activity/<br>Position | Grazing (%) |          | Ruminating (%) |          | Idling (%) |          |
|-----------------------|-------------|----------|----------------|----------|------------|----------|
|                       | Lying       | Standing | Lying          | Standing | Lying      | Standing |
| Sun                   | 0.50        | 44.19    | 3.27           | 0.27     | 3.09       | 1.12     |
| Shade                 | 0.04        | 0.27     | 15.31          | 5.19     | 15.54      | 11.23    |



**Figure 1** - Photovoltaicpanelstructure

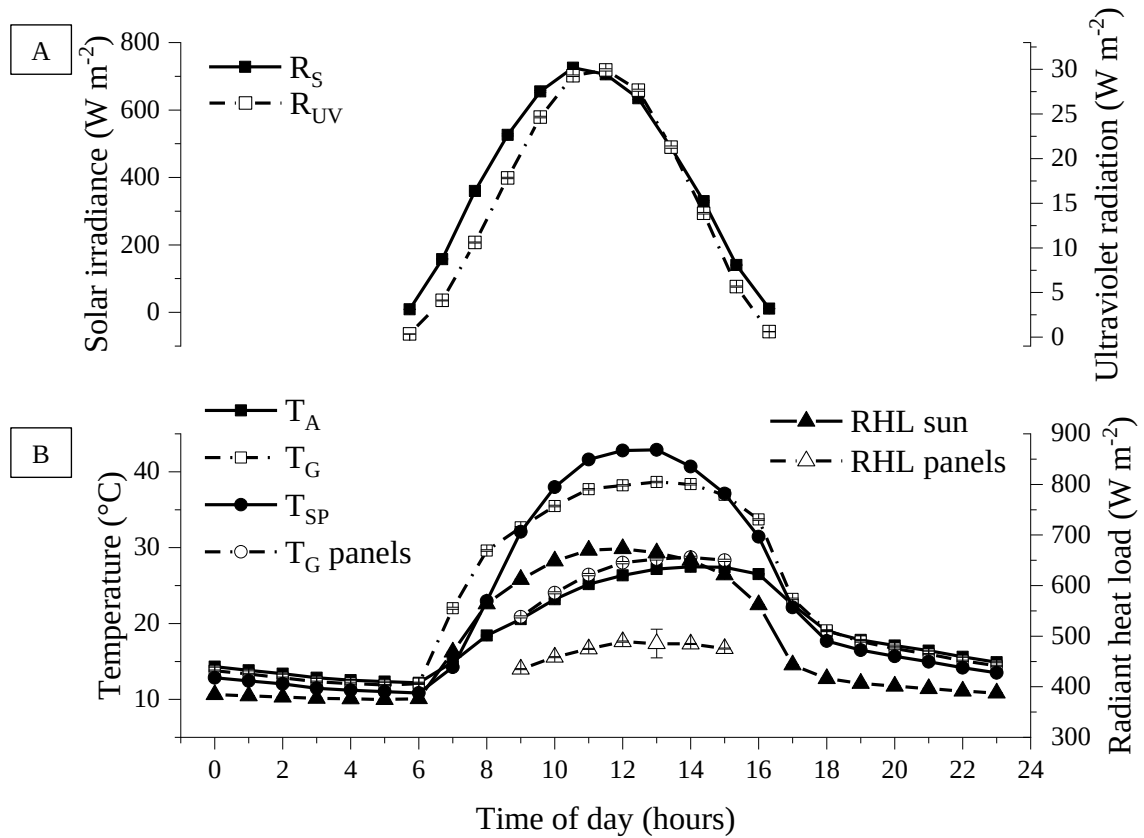


**Figure 2** - Least square means ( $\pm$  SEM) of solar irradiance ( $\text{W m}^{-2}$ ) (○), wind speed ( $\text{m s}^{-1}$ ) (□), air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) (○) and relative humidity (%) (□) throughout the sampling day in experiment

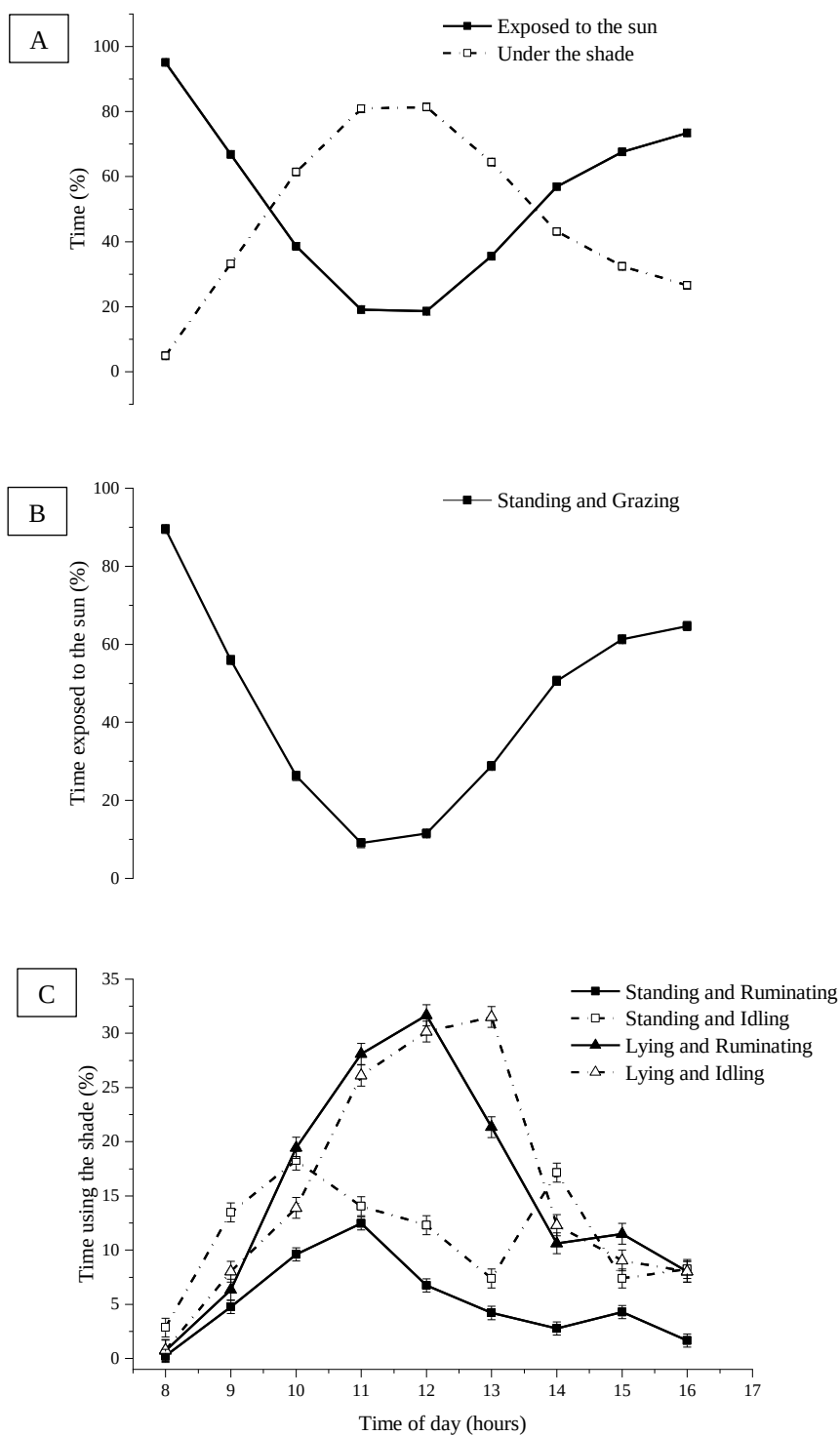


**Figure 3** – Radiant heat load data measured beneath photovoltaic panels shade ( $\circ$ ) and direct solar radiation ( $\bullet$ )

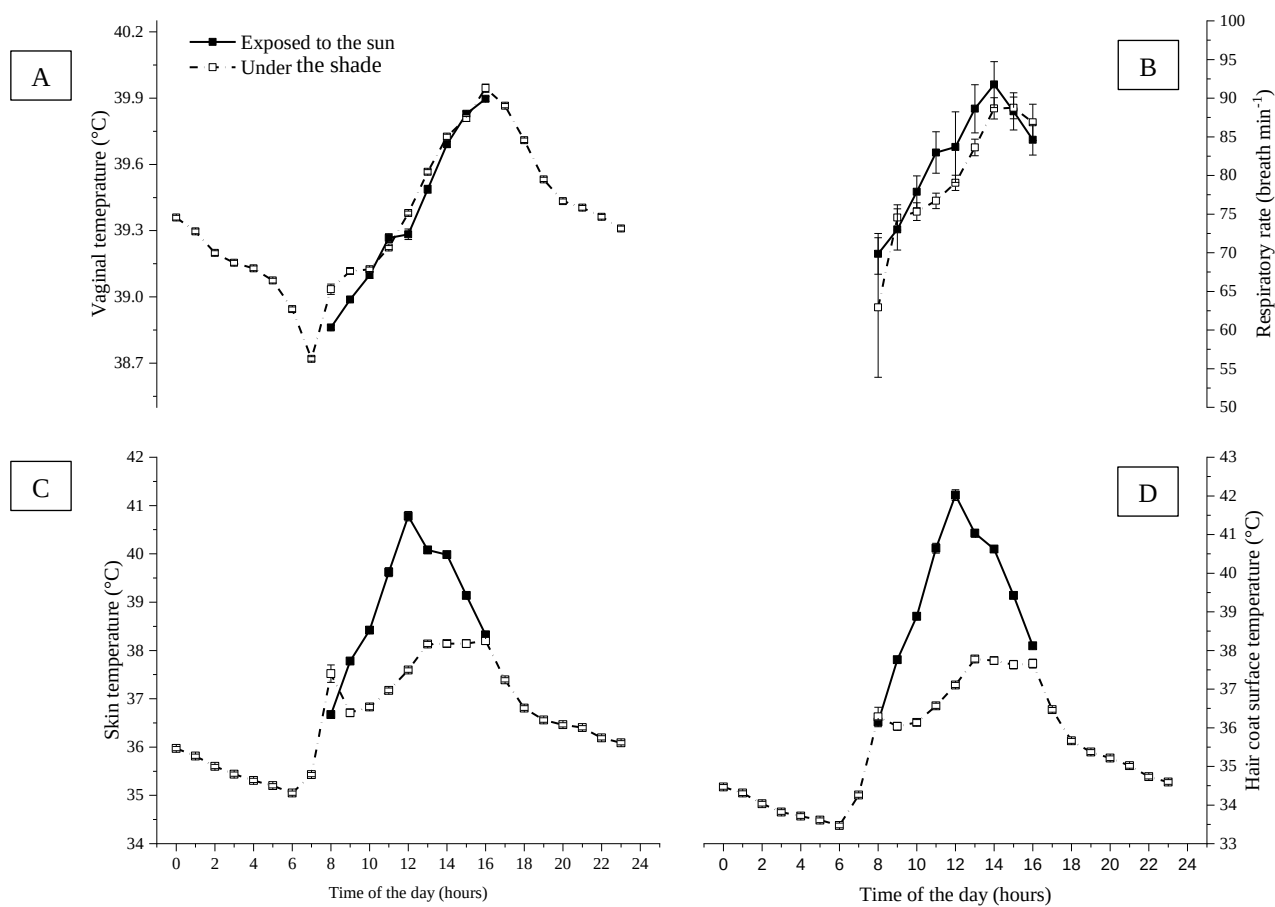




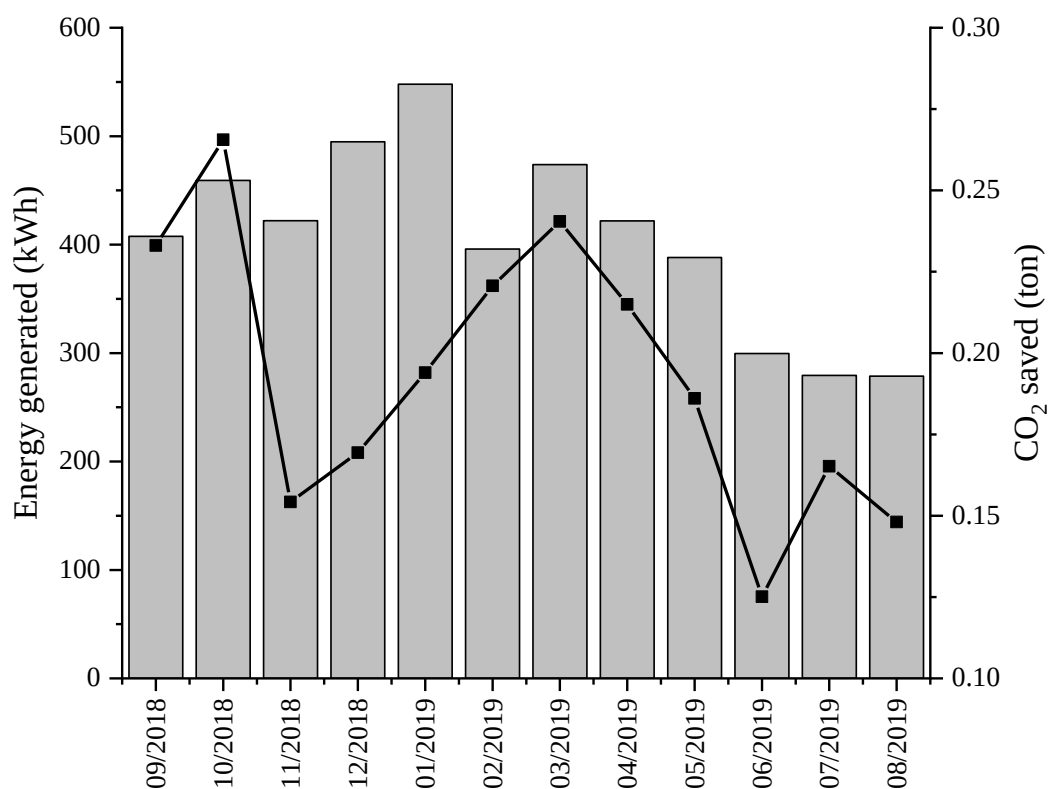
**Figure 4** - Least square means ( $\pm$  SEM) of solar irradiance ( $R_S$ ;  $W m^{-2}$ ) and ultraviolet radiance ( $R_{UV}$ ;  $W m^{-2}$ ) and, air temperature ( $T_A$ ;  $^{\circ}C$ ), black globe temperature exposed to the sun ( $T_G$ ;  $^{\circ}C$ ), underside panel temperature ( $T_{SP}$ ;  $^{\circ}C$ ), black globe temperature under the panels structure ( $T_{G\text{ panels}}$ ;  $^{\circ}C$ ), radiant heat load exposed to the sun (RHL sun;  $W m^{-2}$ ) and radiant heat load under the panels structure (RHL panels;  $W m^{-2}$ ) throughout the sampling day in experiment of thermal comfort



**Figure 5** – Time (%) in the shade or exposed to the sun ( $\pm$  SEM), time (%) under the sun in standing posture and grazing activity ( $\pm$  SEM), and time (%) in the shade in standing and lying posture, and ruminating and idling activities.



**Figure 6** – Least square means ( $\pm$  SEM) of vaginal temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ), respiratory rate (breath  $\text{min}^{-1}$ ), skin temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and hair coat surface temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) under the shade or exposed to the sun throughout the sampling day in experiment



**Figure 7** - Monthly energy generated by the photovoltaic panels (bars) and amount of CO<sub>2</sub> (■) not emitted to the atmosphere during a year