

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL DOUTORADO EM CIÊNCIA ANIMAL

JOÃO BATISTA FREIRE DE SOUZA JUNIOR

TERMORREGULAÇÃO E ATIVIDADE DE FORRAGEAMENTO DE Melipona subnitida NO BIOMA CAATINGA

MOSSORÓ-RN 2019

JOÃO BATISTA FREIRE DE SOUZA JUNIOR

TERMORREGULAÇÃO E ATIVIDADE DE FORRAGEAMENTO DE Melipona subnitida NO BIOMA CAATINGA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciência Animal.

Linha de Pesquisa: Produção Animal.

Orientador: Michael Hrncir, Prof. Dr. UFERSA.

MOSSORÓ-RN 2019 © Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725t Souza Junior, João Batista Freire de. Termorregulação e atividade de forrageamento de Melipona subnitida no bioma Caatinga / João Batista Freire de Souza Junior. - 2019. 81 f. : il. Orientador: Michael Hrncir. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Ciência Animal, 2019. 1. insetos sociais. 2. perda de calor convectivo. 3. radiação solar. 4. semiárido. 5. temperatura do ar. I. Hrncir, Michael, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JOÃO BATISTA FREIRE DE SOUZA JUNIOR

TERMORREGULAÇÃO E ATIVIDADE DE FORRAGEAMENTO DE

Melipona subnitida NO BIOMA CAATINGA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciência Animal.

Aprovação em 23/01/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Michael Hrncir - UFERSA (Orientador – Presidente) Prof. Dr. Carlos Arturo Navas Iannini - USP (Segundo membro) Prof. Dr. Leonardo Lelis de Macedo Costa – UFERSA (Terceiro membro) Prof. Dr. Bonifácio Benicio de Souza UFCG (Quarto membro) MO Prof. Dr. Breno Magalhaes Fr uinto membro

DADOS DO CURRICULARES DO AUTOR

JOÃO BATISTA FREIRE DE SOUZA JUNIOR é brasileiro, natural de Macau-RN, filho de João Batista Freire de Souza e Ana Maria da Costa Souza. Concluiu o ensino médio no Colégio Pequeno Príncipe em Mossoró-RN (2003) e graduou-se em Zootecnia pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) no ano de 2009. Em 2012, tornou-se mestre em Ciência Animal pela mesma instituição, ingressando no doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal da UFERSA no ano de 2015. Desenvolve pesquisas sobre a termorregulação de animais no semiárido, atuando principalmente em estudos que envolvem fatores físicos e fisiológicos atuantes na termorregulação dos animais (mamíferos, aves e abelhas sem ferrão), além de estudar estratégias de atenuação do estresse térmico. Publicou vários artigos em periódicos internacionais, além de ser revisor de algumas revistas nacionais e internacionais: Revista Brasileira de Zootecnia, Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Acta Veterinaria Brasilica, Multidisciplinary Reviews, Journal of Animal Behaviour and Biometeorology e Computers and Electronics in Agriculture. Atua também como editor chefe do Journal of Animal Behaviour and Biometeorology e Multidisciplinary Reviews.

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese à minha filha recém-nascida Giulia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por ser minha força, por me conduzir na realização desse trabalho.

Agradeço à minha esposa, Cheyla, por todo o carinho e paciência para comigo.

Agradeço aos meus pais e meus sogros por todo apoio durante minha vida acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Michael Hrncir, por ter aberto as portas para este desafio na minha vida que foi trabalhar com abelhas e pela excelente orientação e confiança.

Agradeço aos membros da banca, professores Carlos Arturo Navas Iannini, Bonifácio Benicio de Souza, Breno Magalhães Freitas e Leonardo Lelis de Macedo Costa pelas valiosas contribuições para melhoria deste trabalho.

Agradeço ao professor Leonardo Lelis que, além de disponibilizar parte dos equipamentos utilizados neste estudo, sempre foi um amigo e esteve disponível para ajudar no que fosse necessário.

Agradeço aos meus colegas de trabalho Dr. João Queiroz e Dra. Vanessa Oliveira, que se tornaram grandes amigos que a vida acadêmica me deu.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Ecologia Comportamental da UFERSA, Dra. Camila, Sara, Kewen e, especialmente Paloma e Vinício que contribuíram neste trabalho.

Agradeço aos colegas do Laboratório de Biometeorologia e Biofísica Ambiental da UFERSA, Prof. Dr. Leornardo Lelis, Dr. Thibério, Dr. João Paulo, Mateus e Maiko pelos momentos em que compartilhamos e rimos juntos das nossas próprias lutas diárias.

"Inteligência é a capacidade de se adaptar à mudança".

Stephen Hawking

Termorregulação e atividade de forrageamento de *Melipona subnitida* no bioma Caatinga

SOUZA JUNIOR, João Batista Freire de. Termorregulação e atividade de forrageamento de *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. 2019. 81f. Tese (Doutorado em Ciência Animal/Produção Animal). Programa de Pós-graduação em Ciência Animal, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, Brasil, 2019.

RESUMO – Objetivou-se com esse estudo avaliar o efeito da distância entre a colmeia e a fonte de alimento sobre a temperatura corporal (T_s) , atividade de forrageamento e mecanismos termorregulatórios da abelha sem ferrão Melipona subntida no bioma Caatinga. Além disto, um índice para avaliação das condições de estresse térmico para abelhas (TSIB) foi desenvolvido. Para isso, abelhas M. Subnitida foram treinadas para forragear em alimentador artificial contendo 1,5 M de solução de sacarose ad libitum a 15, 50 ou 100 m de distância das colmeias. A atividade de forrageamento foi registrada pelo número de abelhas no alimentador no momento da coleta. A T_S foi obtida por termografia infravermelha em três diferentes regiões corporais: cabeça, tórax e abdômen. Simultaneamente, as variáveis meteorológicas foram registradas. A radiação solar absorvida (R_{ABS}) e os mecanismos termorregulatórios (trocas e calor por convecção (H_C) e radiação de ondas longas (H_R)) foram estimados através de equações biofísicas. O TSIB foi obtido através de dois métodos estatísticos: análise de componentes principais e análise de regressão múltipla. Verificamos que quanto maior for distância entre a colmeia e a fonte de alimento, menor é o número de abelhas forrageando. A T_S das abelhas é influenciada pela distância e, em maior parte, pelas condições meteorológicas do bioma Caatinga. Quanto mais elevadas estiverem a temperatura do ar e radiação solar, menor é a quantidade de abelhas forrageando e maior é sua T_S . O resfriamento corporal através da H_C aumentou à medida que a velocidade do vento se elevou e quando a temperatura do ar estava baixa. Entretanto, este mecanismo tornou-se ineficiente quando a temperatura do ar aumentou, não sendo suficiente para compensar toda a caga de calor recebida do ambiente por R_{ABS} e H_R . As abelhas tiveram dificuldade de manter o equilíbrio térmico com o ambiente quando a fonte de alimento estava a 100 m de distância das colônias. No geral, o equilíbrio térmico foi alcançado em 15 e 50 m. O TSIB é dado como: TSIB = $9,43 + 0,018 RS + 4,895 U - 0,856 T_A + 0,291 UR + 1,562 T_G$, com $R^2 = 0,834$. Palavras-chave: insetos sociais, radiação solar, perda de calor convectivo, semiárido, temperatura do ar.

Thermoregulation and foraging activity of *Melipona subnitida* in the Caatinga biome

SOUZA JUNIOR, João Batista Freire de. Thermoregulation and foraging activity of *Melipona subnitida* in the Caatinga biome. 2019. 81f. Tese (Doutorado em Ciência Animal/Produção Animal). Programa de Pós-graduação em Ciência Animal, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, Brasil, 2019.

ABSTRACT - This study aimed to evaluate the effect of the distance between the hive and the food source on the body temperature (T_s) , foraging activity and thermoregulatory mechanisms of the stingless bee Melipona subntida in the Caatinga biome. In addition, we developed an index for the evaluation of thermal stress conditions for bees (TSIB). M. subnitida bees were trained to forage in an artificial feeder containing 1.5 M sucrose solution *ad libitum* at 15, 50 or 100 m distance from the hives. The foraging activity was recorded by the number of bees in the feeder. T_S was obtained by infrared thermography in three different body regions: head, thorax, and abdomen. Simultaneously, the meteorological variables were recorded. Absorbed solar radiation (R_{ABS}) and thermoregulatory mechanisms (convective heat exchange (H_C) and long-wave radiation exchange (H_R)) were estimated using biophysical equations. TSIB was obtained through two statistical methods: principal component analysis and multiple regression analysis. The greater the distance between the hive and the food source, the smaller the number of foraging bees. T_S is influenced by distance and, in large part, by the meteorological conditions of the Caatinga biome. The higher the air temperature and solar radiation, the smaller the number of foraging bees and the higher T_S . Body cooling by the H_C increased as the wind speed rose and when the air temperature was low. However, this mechanism became inefficient in high air temperature, not being enough to compensate for all the heat received from the environment by R_{ABS} and H_R . The bees had difficulty maintaining the thermal equilibrium with the environment when the food source was 100 m away from the hives. In general, the thermal equilibrium was reached in 15 and 50 m. The TSIB $TSIB = 9.43 + 0.018 RS + 4.895 U - 0.856 T_A + 0.291 UR +$ is given as: 1.562 T_G , with $R^2 = 0.834$.

Keywords: social insects, solar radiation, convective heat loss, semiarid, air temperature.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	15
2.1 Geral	15
2.2 Específicos	15
3. CAPÍTULO 1 - TEMPERATURA CORPORAL E A ATIVIDADE DE	
FORRAGEAMENTO DE ABELHAS SEM FERRÃO (<i>Melipona subnitida</i>)	16
RESUMO	17
ABSTRACT	18
INTRODUÇÃO	19
MATERIAL E MÉTODOS	20
RESULTADOS	23
DISCUSSÃO	28
CONCLUSÃO	30
4. CAPÍTULO 2 - BALANÇO TÉRMICO DE ABELHAS SEM FERRÃO	
Melipona subnitida FORRAGEANDO NO BIOMA CAATINGA	31
RESUMO	32
ABSTRACT	33
INTRODUÇÃO	34
MATERIAL E MÉTODOS	35
RESULTADOS	40
DISCUSSÃO	45
CONCLUSÃO	54
5. CAPÍTULO 3 - UM ÍNDICE PARA PREDIÇÃO DO ESTRESSE	
TÉRMICO EM ABELHAS SEM FERRÃO DURANTE O	
FORRAGEAMENTO	55
RESUMO	56
ABSTRACT	57
INTRODUÇÃO	58
MATERIAL E MÉTODOS	58
RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
CONCLUSÃO	69

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
7. REFERÊNCIAS	71
APÊNDICE A – CORRELAÇÕES ENTRE AS TEMPERATURAS	
CORPORAIS E TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR NAS	
DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS COLMEIAS E O	
ALIMENTADOR ARTIFICIAL	79
ANEXO A - MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BIOMA CAATINGA COM	
BASE NO AUMENTO DA TEMPERATURA	81
ANEXO B - MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BIOMA CAATINGA COM	
BASE NA REDUÇÃO DA PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	82

1. INTRODUÇÃO

As abelhas são insetos que alternam entre o estado ectotérmico e endotérmico (HEINRICH, 1993). No seu ambiente, a radiação solar apresenta-se como uma importante fonte de calor durante o voo, pois as abelhas precisam manter a sua temperatura corporal elevada durante a atividade de forrageamento para obter maior eficiência na exploração dos recursos florais disponíveis na natureza e também para a atividade de voo imediato (STABENTHEINER et al., 2012; STABENTHEINER; KOVAC, 2014). Contudo, quando estes indivíduos estão expostos a elevados níveis de radiação solar direta pode ocorrer um superaquecimento corporal, com consequente morte por hipertermia. Assim, devido ao iminente aquecimento global, entender os níveis de radiação térmica tolerado por abelhas nativas pode ajudar a prever quais as espécies vão se deslocar futuramente para outra região geográfica e quais espécies podem tolerar temperaturas crescentes (DEUTSCH et al., 2008; HOFFMANN et al., 2013; OYEN et al., 2016).

Em abelhas sociais, o ritmo da atividade forrageira ocorre de acordo com as condições meteorológicas enfrentadas em seu ambiente natural, principalmente a temperatura do ar (ROUBIK 1989; HILÁRIO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2012). Em temperaturas muito baixas o forrageamento de *Melipona subnitida* pode não acontecer, mesmo quando fontes de pólen rentáveis estão disponíveis (MAIA-SILVA et al., 2014). O tempo de coleta de pólen desta espécie de abelha nativa do bioma Caatinga é influenciado por temperaturas elevadas associadas com disponibilidade de recursos naturais (MAIA-SILVA et al., 2015). Entretanto, a radiação solar parece ser outra variável abiótica que influencia o forrageamento de abelhas em regiões geográficas próximas a Linha do Equador, onde a radiação solar permanece elevada durante o ano todo (da SILVA et al., 2015).

Em um ambiente de elevada incidência de radiação solar, como é o caso do bioma Caatinga, este elemento meteorológico não pode ser negligenciado. Estudos realizados na região semiárida do nordeste brasileiro encontraram resultados para níveis de radiação solar global acima de 1.000 W.m⁻² das 10:00h as 14:00h (da SILVA et al., 2010). Oliveira et al., (2014) encontraram valores entre 100 e 800 W.m⁻² em horários onde a atividade de forrageamento das abelhas ocorre em maior intensidade (entre 5:30h e 9:00h). Alguns estudos têm sido realizados avaliando o efeito da radiação solar sobre a otimização energética de vespas (KOVAC et al., 2015) e abelhas *Apis mellifera* forrageando água (KOVAC et al., 2010) e alimento (STABENTHEINER; KOVAC, 2014) sob condições de temperatura controlada. Entretanto, em ambiente natural as abelhas campeiras são submetidas a variações meteorológicas que ocorrem no tempo e espaço (BIESMEIJER et al., 1999), além de que, em muitos casos, as abelhas precisam percorrer grandes distâncias para encontrar recursos (ARAÚJO et al., 2004; SILVA et al., 2014). Nesta situação, o benefício gerado pelo ganho de calor através da radiação solar para economizar a produção de calor endotérmico (STABENTHEINER; KOVAC, 2014) é substituído pelo problema do superaquecimento das abelhas (WILLMER; STONE, 2004), conforme mencionado anteriormente. Estas questões ainda precisam ser esclarecidas.

A maioria dos estudos avaliando o efeito da radiação solar sobre os insetos voadores levou em consideração apenas a radiação solar global (por exemplo: WILLMER; UNWIN, 1981; WILLMER, 1983; STABENTHEINER; KOVAC, 2014; KOVAC et al., 2015). Porém, considerar apenas a radiação solar global como o efeito da radiação sobre as abelhas pode ser uma subestimativa, pois negligencia os demais componentes da radiação que incidem sobre a superfície corporal de um determinado organismo. Em ambientes quentes, a radiação de onda longa emitida por qualquer superfície próxima aos animais pode ser mais um item abiótico que compromete o sucesso da atividade de forrageamento.

Dada essa complexidade, muitos aspectos da termorregulação e suas interações com a atividade de forrageamento de abelhas sem ferrão nativas da Caatinga ainda permanecem desconhecidos. Para entender profundamente o efeito ambiente térmico sobre a temperatura corporal de abelhas durante o forrageamento, o conhecimento dos mecanismos físicos de dissipação do excesso de calor corporal, que é absorvido através da radiação solar, torna-se necessário.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Avaliar o efeito da distância entre as colmeias e a fonte de alimento sobre a atividade de forrageamento, temperatura corporal e termorregulação de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* e suas relações com as condições meteorológicas do bioma Caatinga.

2.2 Específicos

- Avaliar o efeito da distância entre a colmeia e a fonte de alimento sobre a temperatura corporal e atividade de forrageamento da abelha sem ferrão *Melipona subntida* no bioma Caatinga.
- (2) Avaliar as relações entre variáveis meteorológicas e a temperatura corporal e atividade de forrageamento destas abelhas sem ferrão.
- (3) Quantificar a radiação solar absorvida por *Melipona subntida* e as trocas de calor por convecção e por radiação de ondas longas entre as abelhas e seu ambiente.
- (4) Determinar as condições de equilíbrio ou desequilíbrio térmico entre as abelhas e o ambiente.
- (5) Desenvolver um índice para avaliação de situações de estresse térmico de abelhas durante o forrageamento.

3. CAPÍTULO 1

TEMPERATURA CORPORAL E A ATIVIDADE DE FORRAGEAMENTO DE ABELHAS SEM FERRÃO (*Melipona subnitida*)

Temperatura corporal e a atividade de forrageamento de abelhas sem ferrão (Melipona subnitida)

RESUMO – Objetivou-se com esse estudo responder as seguintes questões: (1) A distância entre a colmeia e a fonte de alimento é um fator de influência sobre a temperatura corporal e atividade de forrageamento da abelha sem ferrão Melipona subntida no bioma Caatinga? (2) Como as variáveis meteorológicas influenciam a temperatura corporal e atividade de forrageamento destas abelhas sem ferrão? Para elucidar estas perguntas, abelhas sem ferrão nativas do bioma Caatinga (Melipona subnitida) foram treinadas para forragear em alimentador artificial contendo 1,5 M de solução de sacarose ad libitum a 15, 50 ou 100 m de distância das colmeias. A atividade de forrageamento foi registrada pelo número de abelhas no alimentador no momento da coleta. A temperatura corporal das abelhas foi obtida por termografia infravermelha em três diferentes regiões corporais: cabeça, tórax e abdômen. Simultaneamente, as variáveis meteorológicas foram registradas. Nossos resultados mostraram que quanto maior for distância entre a colmeia e a fonte de alimento, menor é o número de abelhas sem ferrão Melipona subntida forrageando. A temperatura corporal destas abelhas é influenciada pela distância e, em maior parte, pelas condições meteorológicas do bioma Caatinga. Quanto mais elevada for a temperatura do ar e a radiação solar, menor é a quantidade de abelhas forrageando e maior serão suas temperaturas corporais.

PALAVRAS-CHAVE: insetos sociais, radiação solar, semiárido, temperatura do ar, termorregulação.

Body temperature and foraging activity of stingless bees (Melipona subnitida)

ABSTRACT - The objective of this study was to answer the following questions: (1) Is the distance between the hive and the food source a factor influencing the body temperature and foraging activity of the stingless bee Melipona subntida in the Caatinga biome? (2) How do meteorological variables influence the body temperature and foraging activity of these stingless bees? In order to elucidate these questions, native stingless bees of the Caatinga biome (Melipona Subnitida) were trained to forage in an artificial feeder containing 1.5 M sucrose ad libitum solution at 15, 50 or 100 m distance from the hives. The foraging activity was recorded by the number of bees in the feeder at the time of collection. The body temperature of the bees was obtained by infrared thermography in three different body regions: head, thorax and abdomen. Simultaneously, the meteorological variables were recorded. Our results showed that the greater the distance between the hive and the food source, the lower the number of stingless bees Melipona sub foraging. The body temperature of these bees is influenced by the distance and, to a large extent, by the meteorological conditions of the Caatinga biome. The higher the air temperature and solar radiation, the smaller the number of foraging bees and the greater the body temperatures.

KEYWORDS: social insects, solar radiation, semiarid, air temperature, thermoregulation.

Durante o voo, a radiação solar é uma importante fonte de energia térmica exterior, pois as abelhas precisam manter a sua temperatura corporal elevada durante o tempo em que estão forrageando com o objetivo de obter maior eficiência na exploração dos recursos florais disponíveis e também para a atividade de voo imediato (STABENTHEINER et al., 2012; STABENTHEINER; KOVAC, 2014). Esta atividade forrageira ocorre de acordo com as condições meteorológicas, principalmente a temperatura (ROUBIK 1989; HILÁRIO et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2012). Em temperaturas muito baixas o forrageamento de *Melipona subnitida* não ocorre, mesmo quando fontes de alimento rentáveis estão disponíveis (MAIA-SILVA et al., 2014). No entanto, em um ambiente de elevada incidência de radiação solar, como é o caso do bioma Caatinga, esta variável ambiental não pode ser negligenciada.

A elevada exposição à radiação solar direta pode ocasionar superaquecimento dos indivíduos, com consequente morte por hipertermia. Devido ao iminente aquecimento global, entender o nível de radiação térmica tolerado por abelhas pode ajudar a prever quais as espécies vão se deslocar futuramente para outra região geográfica e quais espécies podem tolerar temperaturas crescentes (DEUTSCH et al., 2008; HOFFMANN et al., 2013; OYEN et al., 2016).

Alguns estudos têm sido realizados avaliando o efeito da radiação solar sobre a otimização energética de vespas (KOVAC et al., 2015) e abelhas melíferas forrageando água (KOVAC et al., 2010) e alimento (STABENTHEINER; KOVAC, 2014) sob condições de temperatura controlada. Entretanto, em ambiente natural as abelhas campeiras são submetidas a variações meteorológicas que ocorrem no tempo e espaço (BIESMEIJER et al., 1999), além de que, em muitos casos, as abelhas precisam percorrer grandes distâncias para encontrar recursos (ARAÚJO et al., 2004; SILVA et al., 2014). Nesta situação, o benefício gerado pelo ganho de calor através da radiação solar para economizar a produção de calor endotérmico (STABENTHEINER; KOVAC, 2014) pode ser substituído pelo problema do superaquecimento das abelhas (WILLMER; STONE, 2004). Estas questões ainda precisam ser esclarecidas.

Dada essa complexidade, muitos aspectos da termorregulação e suas interações com a atividade de forrageamento de abelhas sem ferrão nativas da Caatinga ainda permanecem desconhecidos. Para entender profundamente o efeito do ambiente térmico sobre a temperatura corporal de abelhas durante o forrageamento, a termografia infravermelha (IRT), por ser uma técnica não invasiva, torna-se valorosa na mensuração da temperatura corporal de animais, principalmente em condições de campo (TATTERSALL 2016). Por não haver contato com o animal a ser estudado, a IRT apresenta-se como uma ferramenta interessante para coleta de dados fisiológicos de abelhas durante o forrageamento em campo aberto.

Neste contexto, objetivou-se com esse estudo responder as seguintes questões: (1) A distância entre a colmeia e a fonte de alimento é um fator de influência sobre a temperatura corporal e atividade de forrageamento da abelha sem ferrão *Melipona subntida* no bioma Caatinga? (2) Como as variáveis meteorológicas influenciam a temperatura corporal e atividade de forrageamento destas abelhas sem ferrão?

MATERIAL E MÉTODOS

Espécie e local de estudo

Abelhas forrageadoras da espécie *Melipona subnitida* (Apidae, Meliponini), uma abelha sem ferrão nativa do bioma Caatinga, foram analisadas entre os meses de agosto e dezembro de 2017. O estudo foi conduzido no meliponário do Espaço ASA (Abelhas Semiárido), instalado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, nordeste do Brasil (latitude 05°11'S, longitude 37°22'W e altitude de aproximadamente16 m). O tipo climático de Mossoró é o tropical semiárido (tipo BSh), segundo a classificação climática de Köppen.

Protocolo experimental e condicionamento das abelhas forrageadoras

Abelhas forrageadoras oriundas de seis colônias criadas em caixas horizontais de madeira (colmeias), seguindo o "modelo nordestino" (BRUENING, 2001) e mantidas no interior do meliponário, foram condicionadas ao forrageamento em alimentadores artificiais expostos à radiação solar direta. Todas as colônias possuíam rainha fisiogástrica e tinham quantidades semelhantes de potes de armazenamento de pólen e mel no início do experimento. O alimentador artificial, fixado a um tripé com um metro de altura do solo, foi confeccionado a partir de uma chapa de isopor e acoplado um recipiente plástico contendo 1,5 M de solução de sacarose *ad libitum*.

As abelhas foram avaliadas em três diferentes distâncias entre o alimentador e as colmeias: 15, 50 e 100 m (Figura 1). A descrição detalhada do período em que ocorreu o condicionamento das abelhas e a coleta dos dados é apresentada na Figura 2, as quais foram realizadas das 5:30 às 12:30 horas. Os dados das abelhas e meteorológicos foram coletados em intervalos de 15 minutos.



Figura 1 – Demonstrativo do local exato onde ocorreram a coleta de dados, especificando o meliponário onde estavam as colônias e as distâncias em que foi instalado o alimentador artificial.



Figura 2 – Descrição do cronograma de condicionamento das abelhas à fonte de alimento (alimentador artificial) e dias em que ocorreu a coleta de dados.

Temperatura corporal e atividade de forrageamento

Foram obtidos cerca de 7.000 dados da temperatura corporal das abelhas (T_s , °C), a qual foi mensurada através de uma câmera termográfica (ThermaCAM[®] SC620, Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos) calibrada para as condições de temperatura ambiente e emissividade cuticular de abelhas ($\varepsilon = 0,97$), conforme determinado por Stabentheiner e Schmaranzer (1987). Dentro do horário em que ocorreu a coleta de dados (5:30 às 12:30 horas) e a cada 15 minutos, a câmera termográfica esteve fixada em um tripé (Figura 3a) e foi programada para obter imagens térmicas durante três minutos, onde imagens foram capturas a cada 10 segundos. Os termogramas (Figura 3b) obtidos foram analisados com o auxílio do programa Flir ThermaCAM Researcher Pro 2.10 (Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos), onde foram analisadas três regiões corporais: cabeça, tórax e abdômen. Adicionalmente analisamos a atividade de forrageamento como a quantidade de abelhas simultâneas que estavam presentes no alimentador succionando a solução de sacarose, através do registro instantâneo.



Figura 3 – Câmera termográfica portátil posicionada no tripé (A) e imagem térmica de abelhas *Melipona subnitida* durante o forrageamento (B).

Variáveis ambientais

Nos dias de coleta de dados, os equipamentos para aferição das variáveis ambientais foram instalados no interior do meliponário, próximo às colônias. A temperatura do ar (T_A , °C) e velocidade do vento (U, m s⁻¹) foram aferidas com um termoanemômetro de precisão de fio quente (Lutron, YK-2005AH, Kolkata, India). A umidade relativa do ar (U_R , %) foi aferida através de um psicrômetro digital (REED Instruments, 8726, Quebec, Canadá). Uma estação meteorológica (Onset Computer Corporation, HOBO RX3003, GSM) instalada na área do meliponário foi responsável por coletar outras variáveis meteorológicas como a precipitação pluviométrica e radiação solar global (RS, W.m⁻²) durante o período em que ocorreu este estudo.

Análise estatística

Para determinar se o número de abelhas forrageando diferiu entre as distâncias estudadas, foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (P < 0.05). Uma análise de variância utilizando o Modelo Linear Geral utilizando o Statistical Analysis System (SAS Institute 1999) foi realizada para avaliar o efeito da distância entre o alimentador artificial e a colmeia sobre a temperatura corporal das abelhas durante o forrageamento e se havia diferença entre as regiões corporais. A interação entre a região corporal e a distância também foi considerada no modelo estatístico. As potenciais diferenças entre as médias foram encontradas através do teste de Tukey (P < 0.05). Uma análise de regressão simples (linear e quadrática) foi realizada para estimar a relação entre as variáveis ambientais (temperatura do ar e radiação solar) e a temperatura corporal e atividade de forrageamento usando o software OriginPro® (Version 8.0, OriginLab 153 Corporation, Northampton, MA). Adicionalmente, correlações entre as variáveis meteorológicas e a temperatura corporal das abelhas para as três regiões corporais dentro de cada distância entre a colmeia e a fonte artificial de alimento (APÊNDICE A) foram obtidas. Antes de iniciar todas as análises mencionadas acima, a distribuição normal através do teste de Kolmogorov-Smirnov foi avaliada.

RESULTADOS

As variáveis ambientais observadas neste estudo apresentaram alta variabilidade, principalmente a radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento (Tabela 1). A temperatura do ar média esteve próximo aos 30,0 °C, variando menos de 1 °C entre as distâncias, mas apresentando amplitude média de 12,47 °C. A radiação solar média foi mais elevada nos dias em que a coleta de dados ocorreu na distância de 50 m,

ultrapassando os 800 W.m⁻². Além disto, a amplitude ultrapassou os 1.000 W.m⁻² nas três distâncias estudadas. A velocidade do vento média encontrada foi de 2,16 m.s⁻¹ e a amplitude máxima de aproximadamente 7,0 m.s⁻¹ foi encontrada na distância de 100 m.

	RS (W.m ⁻²)	TA (°C)	UR (%)	Vv (m.s ⁻¹)
Média geral	784,76±6,85	29,96±0,05	51,25±0,19	2,16±0,02
Distância				
15	739,73 ^b (23 - 1279)	29,27 ^b (22,7 - 35,8)	48,28° (33,0 - 67,8)	$2,32^{a}(0,07-5,36)$
50	827,21ª (49 - 1279)	$30,47^{a}(23,0-35,2)$	51,27 ^b (36,0 - 75,1)	2,11 ^b (0,03 - 6,04)
100	777,76 ^b (77 - 1279)	30,28 ^a (23,5 - 35,6)	$59,38^{a}(44,6-76,8)$	1,86° (0,12 - 7,06)

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis ambientais observadas durante o estudo.

RS: Radiação Solar; TA: Temperatura do Ar; UR: Umidade Relativa do Ar; Vv: velocidade do vento.

Os valores nos parênteses referem-se aos valores mínimos e máximos. Letras diferentes representam diferenças entre as distâncias para cada variável (P < 0.01).

A quantidade média de abelhas forrageando nas distâncias 15, 50 e 100 m foram, respectivamente: 11,18 (mínima de 1,0 e máxima de 41,0), 11,34 (mínima de 1,0 e máxima de 40,0) e 2,28 (mínima de 0 e máxima de 7,0) (Figura 4). Verificou-se que as médias estiveram próximas as medianas e que não houve diferença entre as distâncias de 15 e 50 m, mas ambas diferiram de 100 m (P < 0,05).



Figura 4 – Atividade de forrageamento de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* em diferentes distâncias entre a fonte alimento e a colmeia. (•) Indicam as médias em cada distância. (–) Indicam os *outliers*. (\circ) Indicam todos os dados observados. Letras indicam diferenças significativas entre as distâncias (P < 0,05).

A análise de regressão mostrou uma distribuição quadrática da relação entre a quantidade de abelhas forrageando em alimentador artificial e as variáveis meteorológicas ($RS \ e T_A$), sendo mais expressiva na distância de 15 e 50 m (Figura 5). Em 15 m, verificouse um aumento no número de abelhas forrageando até 750 W.m⁻², onde foi observado uma diminuição acentuada à medida que a RS se elevava e, em 50 m, observou-se que muitas abelhas estavam forrageando em níveis baixos e elevados de RS (Figura 5A). Quando relacionamos a atividade de forrageamento com a T_A , verificou-se um aumento expressivo na quantidade de abelhas forrageando até os 30 °C, diminuindo progressivamente a partir desta T_A (Figura 5B). Poucas abelhas estavam forrageando em 100 m e nenhuma relação significativa com a $RS \ e T_A$ foi observada.



Figura 5 – Atividade de forrageamento de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* em função da radiação solar (A) e temperatura do ar (B).

A análise de variância mostrou efeito significativo da distância, região corporal e sua respectiva interação sobre a T_S das abelhas durante forrageamento (P < 0,05). A T_S apresentou diferença significativa entre a as distâncias estudadas (P < 0,05), com média mais elevada em 50 m (Figura 6). Durante o presente estudo, a temperatura torácica foi a mais alta nas três distâncias avaliadas, diferindo estatisticamente das temperaturas mensuradas na cabeça e abdômen (P < 0,05), as quais não diferiram entre si. A temperatura da cabeça não diferiu entre as distâncias de 15 e 50 m (P = 0,097).



Figura 6 – Efeito da interação entre a região do corpo e a distância analisada sobre a temperatura corporal de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras maiúsculas representam diferenças entre as regiões corporais dentro da mesma distância. A diferença entre as distâncias, na mesma região corporal, é mostrada pelas letras minúsculas.

Encontramos relação de dependência entre T_A e T_S nas três regiões corporais analisadas (abdômen, tórax e cabeça). As equações de predição e seus respectivos coeficiente de determinação estão descritos na Tabela 2. Nas distâncias de 50 e 100 m, a relação foi linear, com aumento progressivo da T_S à medida que a T_A aumentava. Em 15 m, a relação foi polinomial quadrática, onde a T_S também se elevou a medida que a T_A aumentava, mas, quando T_A atingiu os 34 °C, a T_S parou de elevar-se, independente da região corporal analisada (Figura 7).



Figura 7 - A relação entre as temperaturas do ar e das diferentes regiões corporais de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* forrageando em três distâncias distintas entre a colmeia e a fonte artificial de alimento.

Região	Distância	Equações de predição	R ²
Corporal			
Cabeça	15	$T_{Cabeça} = -28,382 + 3,575 \times T_A - 0,049 \times T_A^2$	0,74
	50	$T_{Cabeça} = 8,513 + 0,901 \times T_A$	0,65
	100	$T_{Cabeça} = 0.040 + 1.150 \times T_A$	0,79
Tórax	15	$T_{T \circ rax} = -18,009 + 3,241 \times T_A - 0,044 \times T_A^2$	0,70
	50	$T_{T \circ rax} = 20,553 + 0,647 \times T_A$	0,56
	100	$T_{T \circ rax} = 14,746 + 0,818 \times T_A$	0,70
Abdômen	15	$T_{Abdômen} = -16,875 + 2,664 \times T_A - 0,031 \times T_A^2$	0,79
	50	$T_{Abd\hat{o}men} = 4,461 + 1,042 \times T_A$	0,66
	100	$T_{Abdômen} = -2,667 + 1,245 \times T_A$	0,79

Tabela 2 - Equações de regressões lineares e não-lineares para a temperatura corporal de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* nas diferentes regiões corporais e distâncias estudadas em função da temperatura do ar (TA, °C) durante o forrageamento.

DISCUSSÃO

Os principais alimentos das abelhas são o néctar e o pólen, onde o primeiro é representa sua fonte energética e, o segundo, a fonte proteica (COUVILLON et al. 2015). Estes alimentos são coletados diretamente na natureza, especificamente, nos recursos florais disponíveis, principalmente próximos às colmeias. No entanto, há períodos do ano em que estes recursos são escassos e não estão disponíveis em quantidade necessária próximas aos ninhos e as operárias precisam voar grandes distâncias (SILVA et al. 2014) para obter o recurso para o bom desenvolvimento da colônia.

Em grandes distâncias, a atividade de forrageamento pode ser dispendiosa para as abelhas sociais (COUVILLON et al. 2015), pois o benefício gerado pelo ganho de calor através da radiação solar para economizar a produção de calor endotérmico (STABENTHEINER; KOVAC, 2014) pode ser substituído pelo problema do superaquecimento das abelhas (WILLMER; STONE, 2004). Dantas (2016) afirmou que a temperatura corporal das abelhas acompanha consideravelmente variações na temperatura ambiente, e o desempenho da maior parte de suas atividades é amplamente afetado pela temperatura do ar. Neste contexto, abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* podem percorrer distâncias superiores a 1.000 m para encontrar recursos florais, mas

diminuem em quantidade à medida que a fonte de alimento se distância da colmeia (SILVA et al. 2014). É certo que a atividade forrageira ocorre de acordo com as condições meteorológicas (OLIVEIRA et al., 2012; STABENTHEINER; KOVAC, 2016), onde a temperatura do ar e radiação solar desempenham um papel fundamental no sucesso ou insucesso da coleta de alimento.

Os resultados do presente estudo concordam com os achados na literatura, onde o forrageamento manteve-se elevado quando o alimentador artificial estava relativamente próximo ao ninho (15 e 50 m), mas diminuiu expressivamente em 100 m. Além disto, o número de abelhas forrageando diminuiu progressivamente quando a radiação solar e a temperatura do ar estavam mais elevadas (>750 W.m⁻² e >30 °C, respectivamente), mesmo com o recurso alimentar próximo a colmeia (Figura 5AB). Concordando com os nossos resultados, Basari et al. (2018) mostraram que atividade de forrageamento da abelha sem ferrão *Heterotrigona itama* também diminuía quando a temperatura do ar se elevava.

A elevada variabilidade no número de abelhas forrageando em 50 m (Figura 5A) ocorreu devido aos níveis elevados de radiação solar encontrados ainda pela manhã (> 900 W.m⁻² a partir de 8:30h), horário em que a atividade de forrageamento é elevada.

Este desafio térmico encontrado por abelhas nativas no bioma Caatinga durante o forrageamento está sendo avaliado pela primeira vez no presente estudo. Diferentemente de condições controladas que podem ser obtidas em um laboratório ou câmara climática, a temperatura corporal das abelhas neste estudo foi avaliada em condições naturais de campo, ou seja, em um ambiente variável, onde as variáveis meteorológicas variam no tempo e espaço (BIESMEIJER et al., 1999).

Dentre outros fatores, o estado motivacional das abelhas é dependente da qualidade e quantidade do néctar e da distância entre a fonte de alimento e a colmeia (KOVAC et al., 2018a). Se os recursos florais forem altamente rentáveis para a colônia, as abelhas apresentam uma temperatura corporal mais alta do que as abelhas que buscam fontes de alimento menos lucrativas (STABENTHEINER; KOVAC 2014, 2016; KOVAC et al., 2018a). Neste estudo foi fornecido uma fonte de alimento ilimitado durante todo o período de coleta de dados, variando apenas a distância do alimentador artificial e inter-relacionando-a com as variáveis meteorológicas, principalmente temperatura do ar e radiação solar.

Diferenças na temperatura corporal das abelhas entre as distâncias estudadas foram observadas (Figura 6). Independente da região corporal analisada, a temperatura

foi maior em 50 m e isto se deu devido aos maiores níveis de radiação solar encontrados nos dias em que as coletas de dados ocorreram nesta distância (Tabela 1). A radiação solar direta causa aumento instantâneo na temperatura da superfície corporal de insetos sociais, onde, independente da região corporal, esta relação é altamente positiva, conforme foi visto por Kovac e Stabentheiner (2011) em *A. mellifera carnica* na Europa e por Domingos et al., (2018) em *A. mellifera melífera* no semiárido brasileiro.

A diferença nas temperaturas corporais entre as distâncias de 15 e 100 m que foi encontrada no presente estudo, seja média (Figura 6) ou quando as abelhas foram submetidas a elevadas temperaturas do ar (Figura 7), independente da região corporal, foi atribuída ao custo energético gerado pela maior distância percorrida pelas abelhas em 100 m. Nesta condição, ao percorrer uma longa distância, as abelhas receberam uma maior quantidade de radiação solar direta, o que lhe fez poupar calor endotérmico (STABENTHEINER; KOVAC 2014; STABENTHEINER; KOVAC, 2016; ABOU-SHAARA et al., 2017), mas ocasionou uma maior elevação na temperatura torácica, quando se compara com abelhas que forrageiam próximo ao ninho.

Já é conhecido que as regiões corporais apresentam temperaturas diferentes durante o forrageamento (DOMINGOS et al., 2018; KOVAC et al., 2018a) e isto ocorre devido ao calor endotérmico gerado pelo tórax na atividade de voo. Os resultados do atual estudo mostraram que a temperatura do abdômen e cabeça foram mais baixas que a temperatura torácica e são mais dependentes da temperatura ambiental, quando comparadas com a temperatura do tórax, independente da distância analisada (ver o R² na Tabela 2 e APÊNDICE A).

CONCLUSÃO

Conclui-se que, sob recurso alimentar constante (solução de sacarose), quanto maior for distância entre a colmeia e a fonte de alimento, menor é o número de abelhas sem ferrão *Melipona subntida* forrageando. A temperatura corporal destas abelhas é influenciada pela distância e, em maior parte, pelas condições meteorológicas do bioma Caatinga. Quanto mais elevadas estiverem a temperatura do ar e radiação solar, menor é a quantidade de abelhas forrageando e maior são suas temperaturas corporais.

4. CAPÍTULO 2

BALANÇO TÉRMICO DE ABELHAS SEM FERRÃO *Melipona subnitida* FORRAGEANDO NO BIOMA CAATINGA

Balanço térmico de abelhas sem ferrão *Melipona Subnitida* forrageando no bioma Caatinga

RESUMO - É bem conhecido que as variáveis ambientais influenciam consideravelmente a termorregulação de abelhas durante o forrageamento. Entretanto, estudos sobre a termorregulação de abelhas sem ferrão no momento que estão forrageando são inexistentes, principalmente abelhas no bioma Caatinga. Assim, este estudo quantificou a radiação solar absorvida por Melipona subnitida durante o forrageamento em diferentes distâncias entre as colmeias e a fonte de alimento, bem como as trocas de calor por convecção e por radiação de ondas longas entre abelhas e seu ambiente. Adicionalmente, determinou-se as condições de equilíbrio ou desequilíbrio térmico entre as abelhas e o ambiente. Abelhas sem ferrão nativas do bioma Caatinga (Melipona subnitida) foram treinadas para forragear em alimentador artificial contendo 1,5 M de solução de sacarose ad libitum a 15, 50 ou 100 m de distância das colmeias. A temperatura corporal das abelhas foi obtida por termografia infravermelha em três diferentes regiões corporais: cabeça, tórax e abdômen. Simultaneamente, as variáveis meteorológicas foram registradas. A radiação solar absorvida e as trocas de calor foram estimadas através de equações biofísicas. Os resultados do presente estudo mostraram que abelhas Melipona subnitida recebem e absorvem grande quantidade de radiação solar e calor na forma de radiação de ondas longas. O resfriamento corporal através da perda de calor convectivo aumentou à medida que a velocidade do vento se elevou e quando a temperatura do ar estava baixa. Entretanto, este mecanismo tornou-se ineficiente quando a temperatura do ar era alta, não sendo suficiente para compensar toda a caga de calor recebida do ambiente. As abelhas tiveram dificuldade de manter o equilíbrio térmico com o ambiente quando a fonte de alimento estava a 100 m de distância das colônias. Nesta distância, as abelhas receberam um excesso de calor do ambiente e a convecção foi insuficiente para obtenção do resfriamento corporal, a qual necessitavam. No geral, o equilíbrio térmico foi alcançado em 15 e 50 m.

PALAVRAS-CHAVE: fluxo de calor por radiação de ondas longas, perda de calor convectivo, radiação solar absorvida, semiárido, termorregulação

Thermal balance of stingless bees *Melipona Subnitida* foraging in the Caatinga biome

ABSTRACT - It is well known that environmental variables considerably influence the thermoregulation of bees during foraging. However, studies on the thermoregulation of stingless bees at the moment they are foraging are lacking, especially of bees in the Caatinga biome. Thus, this study quantified the solar radiation absorbed by Melipona subnitida during foraging at different distances between the hives and the food source, as well as convective heat exchanges and long wave radiation between bees and their environment. Additionally, we determined the equilibrium or thermal imbalance conditions between the bees and the environment. Native stingless bees of the Caatinga biome (Melipona Subnitida) were trained to forage in an artificial feeder containing 1.5 M sucrose ad libitum solution at 15, 50 or 100 m distance from the hives. The body temperature of the bees was obtained by infrared thermography in three different body regions: head, thorax and abdomen. Simultaneously, the meteorological variables were recorded. Absorbed solar radiation and heat exchanges were estimated using biophysical equations. Melipona subnitida bees receive and absorb large amounts of solar radiation and heat in the form of long wave radiation. Body cooling through the loss of convective heat increased as the wind speed rose and when the air temperature was low. However, this mechanism became inefficient when the air temperature was high, not being sufficient to compensate for all the heat generated by the environment. The bees had difficulty maintaining the thermal equilibrium with the environment when the food source was 100 m away from the colonies. At this distance, the bees received an excess of heat from the environment and the convection was insufficient to obtain the body cooling, which they needed. In general, the thermal equilibrium was reached in 15 and 50 m.

KEYWORDS: convective heat loss, long-wave radiation heat flow, semi-arid, solar radiation absorbed, thermoregulation

INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas tem sido observadas nas últimas décadas, as quais podem ocasionar elevação na temperatura média da Terra até a metade deste século (IPCC, 2014). A variabilidade climática já causa perdas de colônias de abelhas (SWITANEK et al. 2017) e, em um futuro próximo, variáveis ambientais como a temperatura do ar e a radiação solar podem causar efeitos deletérios sobre a criação de animais. Com isto, a compreensão de como os animais, especialmente as abelhas, lidam com as intempéries climáticas pode ajudar a prever quais espécies podem deslocar-se para outra região geográfica que apresente condições térmicas menos estressantes e quais espécies podem tolerar o iminente aquecimento global (OYEN et al., 2016).

As abelhas são insetos classificados como heterotérmicos, ou seja, alternam entre o estado ectotérmico (o ambiente externo é a principal fonte de calor) e endotérmico (eleva a temperatura corporal usando o calor gerado internamente) (HEINRICH, 1993) e, além disto, se comportam como um complexo sistema termodinâmico, onde há troca de energia com o meio ambiente de forma contínua (DANTAS, 2016) através da superfície cuticular (PAVLOVIĆ et al., 2018). Para exercer a atividade de forrageamento, as operárias são expostas a todos os elementos meteorológicos que compõem o ambiente térmico (vento, temperatura, umidade e radiação solar) durante a atividade voo e no momento da coleta de alimento nos recursos florais disponíveis na natureza. Neste contexto, a temperatura do ar (ABOU-SHAARA et al., 2017). Especificamente em condições de campo, o microclima afeta o desempenho das abelhas no momento da coleta dos recursos florais (STABENTHEINER e KOVAC, 2016).

É bem conhecido que as variáveis ambientais influenciam consideravelmente a termorregulação de abelhas do gênero *Apis* durante o forrageamento (KOVAC et al., 2010; STABENTHEINER e KOVAC, 2014; STABENTHEINER e KOVAC, 2016). No entanto, estudos sobre a termorregulação de abelhas sem ferrão no momento que estão forrageando são inexistentes, principalmente de abelhas no bioma Caatinga. Além disto, este estudo busca quantificar a radiação solar absorvida por abelhas no momento do forrageamento, bem como determinar as trocas térmicas e o balanço de calor existentes entre elas e seu ambiente circundante.

Especificamente, buscou-se responder as seguintes questões: (1) Como se comportam as trocas de calor em abelhas sem ferrão *Melipona subntida* nas condições

meteorológicas do bioma Caatinga? (2) Como a distância entre a colmeia e a fonte de alimento influencia as trocas de calor, a radiação solar absorvida e o balanço de calor de abelhas durante o forrageamento em campo aberto? (3) Há diferença entre as regiões corporais (cabeça, tórax e abdômen) nas trocas de calor entre abelhas e seu microclima? (4) Com base nos resultados encontrados, qual a distância indicada para fornecimento de xarope em alimentador artificial externo para abelhas *Melipona subnitida* no bioma Caatinga?

MATERIAL E MÉTODOS

Espécie e local de estudo

O modelo animal para este estudo foi a abelha sem ferrão *Melipona subnitida*, popularmente conhecida como Jandaíra. O estudo foi realizado no meliponário do Espaço ASA (Abelhas Semiárido) instalado na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, localizada na cidade de Mossoró, RN, Brasil (latitude 05°11'S, longitude 37°22'W e altitude de 16 m). O tipo climático de Mossoró é o tropical semiárido (tipo BSh), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, com 7 a 8 messes secos. A temperatura atmosférica média anual é 27,4 °C e a umidade relativa média do ar é 68,9% (CARMO FILHO e OLIVEIRA, 1995; SOBRINHO et al., 2011).

Protocolo experimental e condicionamento das abelhas forrageadoras

Seis colônias foram utilizadas, as quais estavam estabelecidas há aproximadamente um ano antes do início do experimento, contendo rainha fisiogástrica, favos de cria e amplo estoque de alimento (néctar e pólen). As colônias foram criadas em caixas horizontais de madeira seguindo o "modelo nordestino" (BRUENING, 2001) e mantidas no interior do meliponário.

Estas abelhas foram condicionadas ao forrageamento em alimentadores artificiais expostos à radiação solar direta. Alimentadores artificiais externos são amplamente utilizados na alimentação de abelhas sem ferrão e tem se mostrado úteis em períodos de escassez de alimento natural (CONTRERA et al., 2015). No presente estudo, o alimentador foi confeccionado a partir de uma chapa de isopor e acoplado um recipiente

plástico contendo 1,5 M de solução de sacarose *ad libitum* e fixados a um tripé com um metro de altura do solo.

As abelhas foram avaliadas em três diferentes distâncias entre o alimentador e as colmeias: 15, 50 e 100 m. A descrição detalhada do período em que ocorreu o condicionamento das abelhas e a coleta dos dados é apresentada na Figura 1, as quais foram realizadas das 5:30 às 12:30 horas. Os dados das abelhas e meteorológicos foram coletados em intervalos de 15 minutos.



Figura 1 – Descrição do cronograma de condicionamento das abelhas à fonte de alimento (alimentador artificial) e dias em que ocorreu a coleta de dados.

Imagens térmicas

Imagens térmicas foram obtidas para mensuração da temperatura corporal das abelhas (T_s , °C) com a utilização de uma câmera termográfica portátil (ThermaCAM[®] SC620, Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos) calibrada para as condições de temperatura ambiente e emissividade cuticular de abelhas ($\varepsilon = 0,97$), de acordo com Stabentheiner e Schmaranzer (1987). Esta câmera foi instalada em um tripé, onde a distância entre sua lente e o alimentador foi padronizada em 0,30 m. Os termogramas obtidos foram analisados com o auxílio do programa Flir ThermaCAM Researcher Pro 2.10 (Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos) e as regiões corporais analisadas foram a cabeça, tórax e abdômen.
Dados meteorológicos

O ambiente térmico em campo aberto, onde se encontravam os alimentadores artificiais, foi monitorado quanto à temperatura atmosférica (T_a , °C), umidade relativa do ar (UR, %), velocidade do vento (U, m s⁻¹), temperatura de globo negro (T_g , °C) e radiação solar global (RS, W.m⁻²). T_a e U foram aferidas utilizando-se um termo-anemômetro de fio quente (marca LUTRON, mod. YK-2005AH). UR foram mensuradas através de um psicrômetro digital (REED Instruments, 8726, Quebec, Canadá). RS durante o período de coleta de dados foi mensurada através de uma estação meteorológica (Onset Computer Corporation, HOBO RX3003, GSM) instalada nas proximidades do meliponário. T_g foi aferida por um termômetro de globo digital portátil (marca INSTRUTEMP, mod. ITWTG-2000). Estes equipamentos foram operados manualmente e os dados meteorológicos foram de forma simultânea com a obtenção das imagens térmicas. Calculou-se a temperatura radiante média (TRM, °C) de acordo com a equação proposta por da Silva et al. (2010):

Morfometria

Vinte abelhas forrageadoras foram capturadas na área dos alimentadores para a morfometria das regiões corporais (cabeça, tórax e abdômen). As abelhas foram capturadas em tubos de Falcon 15 ml e eutanasiadas com a adição de algodão embebido em éter. Após este procedimento, foram removidas as pernas e as asas. Cada indivíduo foi fixado em uma placa de isopor com o auxílio de um alfinete. A morfometria foi realizada com as abelhas ainda frescas, para evitar qualquer alteração causada pela desidratação. Para isto, utilizou-se um estereomicroscópio binocular (Modelo Stemi 508, ZEISS). As medidas avaliadas foram: diâmetro da cabeça e tórax, e altura e comprimento do abdômen. Estas medidas morfométricas foram realizadas em milímetros (mm) e, posteriormente, transformadas em metros (m), as quais foram aplicadas nas equações para quantificar a transferência de calor por convecção e radiação de ondas longas, além do fator de conformação para calcular a quantidade de radiação absorvida pelas abelhas.

Transferência de calor por convecção

Utilizando a lei do resfriamento de Newton, as trocas de calor por convecção (H_C , mW) foram determinadas pela equação abaixo (adaptada de INCROPERA e WITT, 2014). Foi multiplicada pela área da superfície corporal de cada região corporal, obtidas por meio da morfometria, assumindo que a cabeça e o tórax são esferas e o abdômen um cilindro.

$$H_{c} = \left(\left(\rho c_{p} (T_{S} - T_{a}) r_{H}^{-1} \right) A \right) 1000 \tag{1}$$

onde ρ é a densidade do ar à temperatura T_a (g m⁻³), c_p é o calor específico do ar (J g⁻¹ °C⁻¹), T_s é a temperatura da superfície corporal das abelhas (°C), T_a é a temperatura do ar (°C), A é a área da superfície corporal (m²) e r_H é a resistência da camada limite à transferência de calor por convecção ($r_H = \rho c_p d/(k N_u)$), estimada de acordo com da Silva e Maia (2013).

Transferência de calor por radiação de ondas longas

Com base na lei de Stefan-Boltzmann, as trocas de calor por radiação de ondas entre abelhas e seu ambiente (H_R , mW) foram calculadas (adaptada de da SILVA e MAIA 2013):

$$H_R = (\varepsilon_c \sigma (T_S^4 - TRM^4)A) 1000 \tag{2}$$

onde $\sigma = 5,67051 \times 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ é a constante de Stefan-Boltzmann, *TRM* é a temperatura radiante média (°C), T_S é a temperatura corporal da abelha (°C) (em cada região corporal), *A* é a área da superfície corporal (m²) e ε_c é a emissividade cuticular das abelhas ($\varepsilon_c = 0,97$), de acordo com Stabentheiner e Schmaranzer (1987).

Radiação de ondas curtas absorvida

Nem toda radiação solar que atinge a superfície corporal de uma abelha que está forrageando em campo é absorvida. A quantidade de radiação solar que é efetivamente absorvida é dada pela equação adaptada de Silva (2008), a qual é o somatório das frações

absorvidas pelas três regiões corporais consideradas no presente estudo (cabeça, tórax e abdômen):

$$R_{ABS} = \left(\left(A_c \left(\left(2 \times \left(F_{CE} \times RS \right) \right) + \left(F_{CC} \times RS \right) \right) \right) A \right) 1000$$
(3)

onde R_{ABS} é a fração da radiação solar de ondas curtas absorvida pela superfície cuticular das abelhas (mW); A_c é a absortância da superfície cuticular da abelha que, conforme Willmer e Unwin (1981) é igual a 0,91; RS (W.m⁻²) é a radiação solar de ondas curtas mensurada com o pirânometro; A é a área da superfície corporal (m²); F_{CE} e F_{CC} são os fatores de conformação utilizados para esfera (cabeça e tórax) e cilindro horizontal (abdômen), respectivamente. O fator de conformação indica a área que é efetivamente atingida pela radiação solar de ondas curtas. Conforme Monteith e Unsworth (1990), a equação (5) para cilindros é mais adequada para utilização em animais, pois trata-se de cilindros com extremidades semi-esféricas.

$$F_{CE} = \frac{0.25}{sen\beta} \tag{4}$$

$$F_{CC} = \frac{2c \ (1 - \cos^2\beta \cos^2\omega)^{0.5} + \pi r^2}{2sen\beta\pi r(c+2r)}$$
(5)

onde β é o ângulo de elevação da fonte de radiação com respeito à superfície horizontal (graus), ω é o ângulo azimutal (horizontal) do eixo do cilindro com respeito à fonte de radiação (graus), *c* e *r* são o comprimento e o raio do cilindro (abdômen), respectivamente.

Balanço de calor

Após quantificar a radiação solar absorvida pelas abelhas, bem como as trocas de calor por convecção e radiação de ondas longas, podemos determinar o balanço de calor (B_T, mW) entre a abelha e seu ambiente durante o forrageamento em campo aberto, totalmente expostas à radiação solar. Nesta equação para o balanço de calor são desconsideradas as possíveis produção de calor endotérmico e perda de calor evaporativo.

$$B_T = R_{ABS} \pm H_R \pm H_C$$

Análise dos dados

A análise estatística dos dados coletados foi realizada de duas formas: análise inferencial e análise correlativa. Após verificar se as pressuposições foram atendidas (normalidade dos resíduos e homocedasticidade), a análise inferencial foi realizada por meio de uma análise de variância (ANOVA) utilizando os Modelo Lineares Gerais (PROC GLM) através do software Statistical Analysis System (SAS, 1999), seguida do teste de Tukey para comparação de médias (P < 0,01). Os efeitos do nível de radiação solar e da distância entre as colônias e o alimentador artificial, além de sua interação estão descritos detalhadamente no modelo matemático abaixo:

$$Y_{ijk} = \mu + RS_i + D_j + I_{ij} + e_{ijk}$$
(7)

onde Y_{ijkl} é o *l*-ésimo dado do balanço de calor, radiação absorvida, transferência de calor por radiação e convecção registrado no *i*-ésimo nível de radiação solar e na *j*-ésima distância; μ é a média geral; *RS* é o efeito fixo do *i*-ésimo nível de radiação solar (*i* = <300, 300-600, 600-900, >900); *D* é o efeito fixo da *j*-ésima distância entre as colônias e o alimentador artificial (*j* = 15, 50, 100); *I_{ij}* é o efeito da interação entre o *i*-ésimo nível de radiação solar e a *j*-ésima distância; e_{ijk} é o efeito residual que inclui as demais fontes de variação não consideradas no modelo.

A análise correlativa foi composta de análises de regressão entre as variáveis meteorológicas e balanço de calor, transferência de calor por radiação e convecção utilizando o software OriginPro[®] (Version 8.0, OriginLab 153 Corporation, Northampton, MA). Também foi realizada análises de regressão entre as mesmas variáveis, considerando, adicionalmente, as diferenças entre as regiões corporais estudadas.

RESULTADOS

Os dados meteorológicos observados no presente estudo são apresentados na Tabela 1. A T_a apresentou uma média em torno dos 30,0 °C, com amplitude média superior a 12,0 °C. A *U* média encontrada foi de 2,16 m.s⁻¹ e a maior média foi encontrada

(6)

na distância de 15 m. A *RS* e a *TRM* apresentaram médias de 784,76 W/m^2 e 67,24 °C, respectivamente, sendo que os maiores valores foram encontrados na distância de 50 m. A média da *UR* foi de 51,25%.

	<i>RS</i> (W.m ⁻²)	<i>T</i> _a (°C)	UR (%)	$U(\mathrm{m.s}^{-1})$	TRM (°C)
Média geral	784,76±6,85	29,96±0,05	51,25±0,19	2,16±0,02	67,24±6,85
Distância					
15	739,73 ^b (23 - 1279)	29,27 ^b (22,7 - 35,8)	48,28° (33,0 – 67,8)	$2,32^{a}(0,07-5,36)$	61,70° (31,11 – 91,02)
50	827,21ª (49 - 1279)	30,47 ^a (23,0 - 35,2)	51,27 ^b (36,0-75,1)	2,11 ^b (0,03 - 6,04)	$68,17^{a}(40,40-99,46)$
100	777,76 ^b (77 - 1279)	30,28 ^a (23,5 - 35,6)	59,38° (44,6 - 76,8)	1,86° (0,12 – 7,06)	62,94 ^b (37,01 - 94,08)

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis meteorológicas durante o estudo.

RS: Radiação Solar; T_a : Temperatura do Ar; *UR*: Umidade Relativa do Ar; *U*: velocidade do vento; *TRM*: Temperatura radiante Média. Os valores nos parênteses referem-se aos valores mínimos e máximos. Letras diferentes representam diferenças entre as distâncias para cada variável (P < 0,05).

A distância entre a colmeia e o alimentador e o nível de radiação solar, além de sua interação apresentaram efeito significativo (P < 0,05) sobre H_C , H_R , R_{ABS} e B_T (ver Tabela 2 e Figuras 2, 3, 4, 5, 6 e 7). A H_C foi mais alta em 50 m e apresentou menores valores em 100 m e elevou-se a medida que a *RS* se elevava. Em outra mão, a H_R apresentou seus menores valores em 50 m e decrescia significativamente com o aumento da radiação solar. A R_{ABS} foi maior em 100 m, apresentando diferença das demais distâncias (15 m e 50 m), as quais não diferiram entre si. A R_{ABS} também se elevou quando foram observados níveis elevados de radiação solar.

Em relação ao balanço de calor (B_T , mW), observou-se diferenças entre as distâncias estudadas, onde 15 m e 50 m não diferiram e estiveram próximos a zero (equilíbrio térmico), mas ambas foram diferentes de 100 m, a qual apresentou balanço de calor negativo, ou seja, as abelhas estavam ganhando calor do ambiente. A radiação solar também influenciou o B_T . Em níveis baixos de RS (<300 W/m²) o balanço de calor era positivo (abelhas perdendo calor para o meio ambiente), alcançando equilíbrio térmico em níveis medianos de RS (300-600 e 600-900 W/m²) e tornando-se negativo e em níveis elevados de RS (<300 W/m²).

Fazendo o detalhamento da interação (Distância x Níveis de radiação) para B_T , verificou-se comportamentos peculiares. Em baixa *RS*, O B_T das abelhas em 50 m é positivo, diferindo das demais distâncias, as quais não diferiram entre si. Quando a *RS* estava entre 300 e 600 W/m², o B_T foi baixo (próximo a zero) e não diferiu entre as distâncias. Já para *RS* entre 600-900 W/m², todas as distâncias diferiram entre si e, em 15

m, o B_T foi positivo apresentando média em torno de 20,0 mW. Em 50 m, as abelhas apresentavam-se em equilíbrio térmico, com média próxima a zero e, em 100 m, o B_T estava negativo, com valor médio próximo aos 30 mW de ganho de calor do ambiente. Em níveis altos de radiação solar (>900 W/m²), as abelhas estavam em desequilíbrio térmico, independente da distância estudada.

Tabela 2 – Medias ajustadas por quadrados mínimos das trocas de calor por convecção (H_C, mW) e radiação de ondas longas (H_R, mW) , além da radiação solar absorvida (R_{ABS}, mW) por abelhas no bioma Caatinga.

Fonte de	H_C	H_R	R _{ABS}
variação			
Distância			
15	$50,98{\pm}0,88^{b}$	$-6,91\pm0,44^{a}$	39,21±0,41 ^b
50	$60,72{\pm}0,75^{a}$	-21,31±0,43°	$40,40{\pm}0,38^{b}$
100	46,30±1,25 ^b	-15,71±0,73 ^b	$42,37{\pm}0,50^{a}$
Radiação solar			
<300	42,77±1,57 ^c	-8,93±0,83°	19,60±0,69 ^d
300-600	$50,45{\pm}0,92^{b}$	-10,19±0,54ª	35,49±0,38°
600-900	57,71±1,20 ^a	-12,94±0,70 ^b	49,16±0,55 ^b
>900	59,73±0,66ª	-26,52±0,38°	58,40±0,26ª

Letras diferentes representam diferenças dentro de cada fonte de variação (distância ou nível de radiação solar) para cada variável (P < 0.05).

A análise de regressão mostrou uma relação linear e quadrática entre a perda de calor por convecção e a velocidade do vento e temperatura do ar, respectivamente (Figura 8). A H_C aumentou progressivamente com a elevação de U, alcançando valores superiores a 100 mW quando a U foi maior que 4,0 m/s. A U conseguiu explicar 65% da variação observada em H_C (Figura 8A). Já na relação entre H_C e T_a (Figura 8B), observou-se o aumento da H_C à medida que T_a se elevava até os 30 °C, temperatura na qual a H_C começou a decrescer. Quando a H_R é relacionada com a $RS \ e \ TRM$, observa-se uma relação linear com ambas as variáveis meteorológicas (Figura 9). Encontrou-se valores inferiores a -50,0 mW para H_R quando $RS \ e \ TRM$ estavam elevadas (o sinal de negativo para H_R significa que as abelhas estavam recebendo esta quantidade de calor do

ambiente). A *TRM* mostrou-se como uma variável meteorológica interessante para explicar a variação de H_R , com $R^2 = 0.92$. O B_T apresentou relação inversa com *RS e T_a* (Figura 10), sendo positivo (abelhas perdendo calor para o meio) em valores baixos e negativo (abelhas ganhando calor do meio) em valores elevados de *RS e T_a*, respectivamente.



Figura 2 – Efeito da interação entre a classe de radiação solar e a distância analisada sobre a perda de calor por convecção em abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras maiúsculas representam diferenças entre os níveis de radiação solar na mesma distância. A diferença entre as distâncias, no mesmo nível de radiação solar, é mostrada pelas letras minúsculas.

A mesma relação linear entre H_C e U nas três regiões corporais foi encontrada: abdômen, tórax e cabeça (Figura 11). A H_C foi maior no tórax, independentemente do valor de U, mas os valores da H_C , nas três regiões corporais, estiveram próximos quando U era baixa. A medida que U aumentava, também se aumentava a distância entre as regiões corporais. Na Figura 12 observamos relação quadrática entre H_C e T_a nas três regiões corporais, onde o tórax apresentou os maiores valores. Em ambas as regiões corporais foi observada uma relação linear e inversa entre a H_R e as duas variáveis meteorológicas relacionadas com a radiação ($RS \ e \ TRM$). Os valores mais expressivos foram encontrados nas regiões do tórax e abdômen e, na cabeça, os valores de H_R não ultrapassaram os -5,0 mW (abelhas recebendo 5 mW do ambiente).



Figure 3 – Efeito da interação entre a classe de radiação solar e a distância analisada sobre o fluxo de calor por radiação de ondas longas em abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras maiúsculas representam diferenças entre os níveis de radiação solar na mesma distância. A diferença entre as distâncias, no mesmo nível de radiação solar, é mostrada pelas letras minúsculas.



Figure 4 – Efeito da interação entre a classe de radiação solar e a distância analisada sobre a radiação de ondas curtas absorvidas por abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras maiúsculas representam diferenças entre os níveis de radiação solar na mesma distância. A diferença entre as distâncias, no mesmo nível de radiação solar, é mostrada pelas letras minúsculas.

O bioma Caatinga está localizado no Nordeste brasileiro. Por ser um bioma estabelecido dentro de uma região geográfica de clima tropical semiárido, as temperaturas são altas o ano inteiro e, além disto, há uma irregularidade na distribuição da precipitação pluviométrica. Somando-se a estas características climáticas, elevados níveis de radiação solar ocorrem o ano inteiro nas faixas geográficas próximas a Linha do Equador. As previsões de cenários futuros de mudança climática para este bioma são preocupantes (ACOSTA et al., 2017). Uma elevação de 3,1 a 4,6 °C na temperatura (MAPA 1) e uma diminuição de até 200 milímetros na pluviosidade (MAPA 2) são esperadas na Caatinga até 2080 (ACOSTA et al., 2017). Esta conjuntura deverá ocasionar alterações consideráveis neste bioma tipicamente brasileiro, onde áreas desérticas poderão surgir e a biodiversidade poderá ser potencialmente afetada (ACOSTA et al., 2017). Esta condição meteorológica adversa aliada a escassez de vegetação arbórea para construção de ninhos e de plantas que disponibilizem alimento para as espécies animais, especialmente abelhas nativas, podem causar um deslocamento para outra região geográfica com condições mais favoráveis à sobrevivência, mas é possível que existam espécies que tolerem estes cenários de clima desfavorável nas próximas décadas (DEUTSCH et al., 2008; HOFFMANN et al., 2013; OYEN et al., 2016).



Figura 5 – Efeito da distância entre o alimentador artificial e a colmeia sobre o balanço total de calor de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras indicam diferenças significativas entre as distâncias (P < 0,05).



Figura 6 – Efeito da radiação solar sobre o balanço total de calor de abelhas sem ferrão *Melipona* subnitida no bioma Caatinga. Letras indicam diferenças significativas entre as distâncias (P < 0.05).



Figure 7 – Efeito da interação entre a classe de radiação solar e a distância analisada sobre o balanço total de calor de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* no bioma Caatinga. Letras maiúsculas representam diferenças entre os níveis de radiação solar na mesma distância. A diferença entre as distâncias, no mesmo nível de radiação solar, é mostrada pelas letras minúsculas.

Uma das espécies que pode ser impactada por tais mudanças iminentes é a abelha sem ferrão *Melipona subnitida* Ducke (Apidae, Meliponini), nativa e endêmica do nordeste brasileiro. Esta abelha é considerada por muitos como adaptada ao clima semiárido (quente e seco), mesmo com uma moderada quantidade de estudos sobre os efeitos do ambiente térmico sobre esta espécie (GIANNINI et al., 2012). As pesquisas sobre este tema com foco em *M. subnitida* tem se concentrado na avaliação da variação temporal da produção de mel e sua relação com o clima (Koffler et al., 2015), a influência de variáveis meteorológicas sobre o forrageamento de pólen e atividades internas da colônia (MAIA-SILVA et al., 2015), além de estudos que tratam da tolerância térmica em ambiente controlado e desempenho de colônias em condições de casa de vegetação (SILVA et al., 2017).

O equilíbrio térmico entre as abelhas e o seu ambiente durante o forrageamento, levando em consideração a produção de calor endotérmico e os ganhos e perdas de calor corporal para o ambiente não é bem conhecido (STABENTHEINER et al., 2012; STABENTHEINER e KOVAC, 2014). O presente estudo buscou elucidar as interações biofísicas que ocorrem entre a abelha sem ferrão *Melipona subnitida* e as condições meteorológicas encontradas no bioma Caatinga. Especificamente, esta pesquisa buscou determinar o balanço térmico desta espécie de abelha durante o forrageamento, totalmente expostas à radiação solar. A literatura atual é carente de estudos que quantifiquem, em termos de energia térmica, o quanto de calor uma abelha dissipa ou recebe do ambiente, seja por mecanismos convectivos ou por radiação infravermelha (620–750 nm), ou ainda, o quanto de radiação solar (<440 nm) é absorvida por sua cutícula. Outro agravante é que grande parte dos estudos foram realizados em condições ambientais controladas, diferentemente do nosso estudo, o qual foi realizado em condições de campo, ou seja, em um ambiente variável, onde as variáveis meteorológicas variam no tempo e espaço (BIESMEIJER et al. 1999).

Um inseto endotérmico precisa elevar sua temperatura torácica para estar pronta para a atividade de voo. Eles podem produzir calor endotérmico utilizando os músculos torácicos com o batimento das asas ou economizá-lo recebendo calor proveniente da radiação solar (UNDERWOOD, 1991; KOVAC et al., 2018b). Durante o voo (UNDERWOOD, 1991) e o forrageamento (KOVAC et al., 2010; KOVAC e STABENTHEINER, 2011), as abelhas elevam sua temperatura torácica acima da temperatura ambiente e depois busca o equilíbrio térmico, através da perda, produção ou ganho de calor do ambiente. Se os recursos alimentares estão disponíveis à sombra, o equilíbrio entre a temperatura corporal e a ambiental é alcançado dentro de minutos (HEINRICH, 1974).



Figura 8 – Perda de calor convectivo de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) em função da velocidade do vento (A) e temperatura do ar (B).



Figura 9 – Fluxo de calor por radiação de ondas longas de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) em função da radiação solar (A) e temperatura radiante média (B).

No entanto, em ambientes caracterizados por níveis elevados de radiação solar, a quantidade de calor recebida do ambiente pode ser excessivamente alta e os mecanismos de resfriamento, sejam convectivos e/ou evaporativos, podem não ser suficientes para manutenção da homeostase térmica. No nosso estudo, independente da distância entre a colmeia e o local de forrageamento (alimentador artificial), à medida que se elevaram os níveis de radiação solar, elevavam-se os ganhos de calor absorvidos por radiação solar de ondas curtas (Tabela 2 e Figura 4) e por radiação de ondas longas (Tabela 2, Figuras 3, 9A e 14). Neste momento, as abelhas precisaram ativar mecanismos para o resfriamento corporal, o qual foi observado pelo aumento discreto da perda de calor por convecção (Tabela 2), a qual foi elevada quando a velocidade do vento maximizou seus valores (Figuras 8A e 11). A movimentação do ar é a força motriz do mecanismo convectivo (ROBERTS e HARRISON, 1998), mas teve seu beneficio reduzido quando a temperatura ambiente ultrapassou os 30 °C (Figuras 8B e 12). A eficiência na perda de calor convectivo foi comprometida devido a diminuição no gradiente formado entre a temperatura corporal e a temperatura do ar, o qual é o fator determinante para o sucesso deste sistema termodinâmico. Nestas condições de elevada radiação solar, o balanço térmico foi negativo (Figuras 6, 7 e 10B), indicando que as abelhas e seu microclima estavam em desequilíbrio pelo excesso de calor recebido do ambiente.

Adicionalmente, se a fonte de alimento for distante da colmeia, a situação pode agravar-se ainda mais. Ao percorrer longas distâncias em busca de alimento, as operárias são expostas a radiação solar direta por mais tempo durante o voo (ida e volta da colmeia) e durante o forrageamento. No presente estudo, as abelhas sem ferrão forrageando na maior distância (100 m) apresentaram uma maior absorção de radiação solar de ondas curtas (Tabela 2), receberam do ambiente uma maior quantidade de calor na forma de radiação de ondas longas (Figura 3) e apresentaram o menor valor de perda de calor conectivo (Tabela 2). Isto representou um balanço térmico negativo (Figuras 5 e 7), ou seja, desequilíbrio térmico, em que as abelhas estavam recebendo excesso de calor do ambiente durante a atividade de forrageamento em maiores distâncias entre a colmeia e a fonte de alimento.

Entretanto, houve um comportamento distinto do balanço térmico ao analisar as abelhas nas diferentes distâncias e expostas a níveis baixos (<300 W/m²), moderados (300-600 e 600-900 W/m²) e severos (>900 W/m²) de radiação solar (Figura 7). Em 15 e 50 m, as abelhas não tiveram dificuldade de se termorregular com o ambiente em níveis baixos e moderados de radiação solar, estando em equilíbrio ou perdendo calor para o

meio. Diferentemente, em 100 m, o equilíbrio térmico foi alcançado apenas em níveis baixos de radiação solar e em 300-600 W/m². Independente da distância estudada, o estado de desequilíbrio térmico entre abelhas e seu ambiente durante o forrageamento é evidente em níveis severos de radiação solar (Figura 7).



Figura 10 – Balanço de calor de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) em função da radiação solar (A) e temperatura do ar (B).

Kovac et al., (2018a) afirmaram que uma alta temperatura corporal obtida por atividade endotérmica significa um alto gasto energético. Esse alto investimento em energia metabólica tem sido observado em abelhas do gênero *Apis* (STABENTHEINER e KOVAC 2014, 2016) e vespas (KOVAC et al., 2018b). Esta estratégia fisiológica fazse necessária em ambientes de baixa temperatura. Neste caso, o ganho de calor proveniente da radiação solar é usado para elevar a temperatura corporal sem esforço metabólico adicional ou ainda para economizar energia (KOVAC et al., 2018b). No entanto, acreditamos que, no presente estudo, isto tenha ocorrido somente em baixos e moderados níveis de radiação solar. Quando a temperatura ambiente estava elevada e atrelada à altos níveis de radiação solar direta, outro problema surge para animais no bioma Caatinga: o superaquecimento (WILLMER e STONE, 2004), o qual é evidenciado pelo desequilíbrio térmico entre as abelhas e o ambiente. Church (1960a) estimaram a perda de calor por radiação de ondas longas em diversas espécies de insetos, dentre eles as abelhas, sugerindo ser um mecanismo de resfriamento corporal ineficiente, correspondendo apenas a 10-15% da perda total de calor. O mesmo autor revelou que a convecção se comportava como um mecanismo de resfriamento corporal (60-80% da perda total de calor), indicando que, dentre os fatores de influência, a velocidade do vento e o excesso de calor corporal, o qual gera um maior gradiente entre temperatura corporal e ambiental, seriam os principais. As demais vias de dissipação térmica seriam através da evaporação (não mais do que 5-10%) e por condução para outras partes do corpo (cabeça e abdômen), cerca de 5-15% (CHURCH, 1960b).

No nosso estudo, 100% do calor perdido por abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* forrageando em alimentador artificial, expostas à radiação solar direta ocorreu por convecção (ver Tabela 2 e Figuras 2 e 3), independentemente do nível de radiação ou distância estudada. Nossos resultados corroboram com o que afirmaram Cooper et al., (1985) e Roberts e Harrison (1998), em que a radiação de ondas longas se comportou como uma via adicional de ganho de calor do ambiente, a qual foi somada à absorção de calor proveniente da radiação solar, resultando em um desequilíbrio no balanço térmico (ver Figuras 5, 6 e 7).

Ao analisarmos a perda de calor convectivo e as trocas de calor por radiação de ondas longas nas diferentes regiões corporais, verificamos um padrão de variação semelhante (Figuras 11, 12, 13 e 14), onde os menores valores foram encontrados na cabeça para ambos os mecanismos termorregulatórios, e os mais expressivos na região torácica para H_C . Isto ocorreu devido sua maior temperatura em relação a temperatura ambiental (CASEY, 1992; ROBERTS e HARRISON, 1998). As regiões do abdômen e tórax apresentaram valores bem próximos para a H_R . Em situações de superaquecimento da região torácica, provocado pelo acúmulo de calor endotérmico oriundo da atividade de voo e pelo excesso de calor radiante absorvido pela superfície corporal, ocorre uma transferência (condução) de calor para as outras regiões do corpo (ROBERTS e HARRISON, 1998), principalmente abdômen, o qual funciona melhor que a cabeça para dissipar o excesso de calor corporal devido sua maior área superficial exposta ao ambiente circundante (CASEY, 1992) e pela ausência de uma camada de pelos, a qual causa uma resistência a perda de calor no tórax. No entanto, sua maior área corporal, em relação à cabeça, e o fator aditivo de sua cor negra em Melipona subnitida fizeram com que se tornasse uma via adicional de ganho de calor através da H_R (Figuras 13 e 14).



Figura 11 - A relação entre a perda de calor por convecção nas diferentes regiões corporais de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) e a velocidade do vento observada no período total do estudo.



Figura 12 - A relação entre a perda de calor por convecção nas diferentes regiões corporais de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) e a temperatura do ar observada no período total do estudo.



Figura 13 - A relação entre o fluxo de calor por radiação de ondas longas nas diferentes regiões corporais de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) e a temperatura radiante média observada no período total do estudo.



Figura 14 – A relação entre o fluxo de calor por radiação de ondas longas nas diferentes regiões corporais de abelhas sem ferrão (*Melipona subnitida*) e a radiação solar observada no período total do estudo.

CONCLUSÃO

Abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* recebem e absorvem grande quantidade de radiação solar e calor na forma de radiação de ondas longas. O resfriamento corporal através da perda de calor convectivo aumentou à medida que a velocidade do vento se elevou e quando a temperatura do ar estava baixa. Entretanto, este mecanismo tornou-se ineficiente quando a temperatura do ar estava elevada, não sendo suficiente para compensar toda a carga de calor recebida do ambiente.

As abelhas tiveram dificuldade para manter-se em equilíbrio térmico com o ambiente quando o alimentador artificial estava a 100 m de distância das colônias. Nesta distância, as abelhas receberam um excesso de calor do ambiente e a convecção foi insuficiente para obtenção do resfriamento corporal, a qual necessitavam. No geral, o equilíbrio térmico foi alcançado em 15 e 50 m.

A região da cabeça apresentou participação inexpressiva nas trocas de calor entre as abelhas e seu ambiente circunvizinho. Já o tórax e abdômen atuaram de forma efetiva, principalmente no resfriamento convectivo.

E, finalmente, sugerimos a distância de 15 metros entre as colmeias de *Melipona subnitida* e alimentadores artificiais contendo xarope (solução de sacarose) para provimento de alimento energético em períodos de escassez de recursos florais no bioma Caatinga.

5. CAPÍTULO 3

UM ÍNDICE PARA PREDIÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM ABELHAS DURANTE O FORRAGEAMENTO

RESUMO - Abelhas enfrentam uma situação térmica desafiadora durante a coleta de alimento na natureza. Neste cenário, o primeiro índice para avaliar as condições de estresse térmico de abelhas durante o forrageamento foi desenvolvido. Este índice é baseado em respostas termorregulatórias de abelhas sem ferrão da espécie Melipona subnitida e engloba as principais variáveis meteorológicas enfrentadas por estes insetos no momento que estão coletando alimento em seu ambiente natural. Estas abelhas foram treinadas para o forrageamento em um alimentador artificial exposto à radiação solar direta contendo 1,5 M de solução de sacarose ad libitum. A temperatura corporal destas abelhas foi mensurada através da termografia infravermelha e suas trocas térmicas com o ambiente foram estimadas. As condições meteorológicas durante o período de estudo também foi avaliada. A análise de componentes principais (ACP) e a análise de regressão foram utilizadas para obtenção do índice térmico. As temperaturas no tórax, cabeça e abdômen das abelhas, as trocas térmicas por radiação de ondas longas e convecção, e a radiação solar absorvida foram sumarizadas em apenas uma variável sintética. A ACP mostrou que apenas um componente principal apresentou um autovalor > 1 (λ_1 = 3,737619), explicando 62.29 % da variância total. O autovetor associado a este componente principal foi aplicado em uma regressão múltipla com as variáveis meteorológicas, onde todas foram altamente significativas (P < 0,001) e entraram no modelo. Desta forma, o Índice de Estresse térmico para Abelhas (TSIB) durante o forrageamento é dado como: $TSIB = 9,43 + 0,018 RS + 4,895 U - 0,856 T_A +$ 0,291 UR + 1,562 T_G , o qual apresentou um elevado coeficiente de determinação (R^2 = 0,834). O TSIB apresentou correlações significativas com as variáveis meteorológicas e termorregulatórias. Três intervalos para aplicação prática do TSIB são sugeridos: <75 ausência de estresse, 76 à 105 estresse moderado e >105 estresse severo.

PALAVRAS-CHAVE: índice térmico, *Melipona subnitida*, radiação solar, respostas termorregulatórias, temperatura corporal.

An index for predicting thermal stress in bees during foraging

ABSTRACT - Bees face a challenging thermal situation while collecting food in nature. In this scenario, we developed the first index to evaluate the thermal stress conditions of bees during foraging. This index is based on the thermoregulatory responses of stingless bees Melipona subnitida and encompasses the main meteorological variables faced by these insects at the food collecting moment in their natural environment. These bees were trained for foraging in an artificial feeder exposed to direct solar radiation containing 1.5 M sucrose solution ad libitum. Body temperature through infrared thermography was measured and its thermal exchanges with the environment were estimated. We also evaluated meteorological conditions during the study period. Principal component analysis (ACP) and regression analysis were used to obtain the thermal index. The thorax, head, and abdomen temperatures, heat exchanges by long-wave radiation and convective, and the absorbed solar radiation were summarized in only one synthetic variable. ACP showed that only one principal component had an eigenvalue > 1 ($\lambda_1 = 3.737619$), explaining 62.29% of the total variance. The eigenvector associated with this principal component was applied in a multiple regression with the meteorological variables, where all were highly significant (P < 0.001) and entered the model. Thus, the Thermal Stress Index for Bees (TSIB) during foraging is given as: TSIB = 9.43 + 0.018 RS +4.895 $U - 0.856 T_A + 0.291 UR + 1.562 T_G$, which presented a high coefficient of determination ($R^2 = 0.834$). TSIB presented significant correlations with the meteorological and thermoregulatory variables. Three intervals for the practical application of TSIB are suggested: <75 absence of stress, 76 to 105 moderate stress and >105 severe stress.

KEYWORDS: body temperature, *Melipona subnitida*, solar radiation, thermal index, thermoregulatory responses.

INTRODUÇÃO

O desafio térmico enfrentado pelos animais durante a busca por alimento em seu ambiente natural está intimamente associado às mudanças climáticas. Esta associação do estresse térmico com o aquecimento global se tornou um fator amplamente estudado nas últimas décadas, pois influencia negativamente a vida animal (RASHAMOL et al., 2018).

Quando tratamos especificamente das abelhas operárias, verificamos que estes pequenos insetos enfrentam uma intensa adversidade térmica causada pela exposição direta aos elementos meteorológicos. Apesar de serem importantes fontes externas de calor para as abelhas (STABENTHEINER e KOVAC, 2014), as quais são insetos heterotérmicos (HEINRICH, 1993), se a radiação solar e a temperatura do ar estiverem muito baixas ou muito altas, a coleta de recursos florais diminui de forma acentuada (MAIA-SILVA et al., 2014).

Neste cenário, diversos modelos matemáticos, desenvolvidos através de diferentes metodologias estatísticas, foram criados no intuito de avaliar situações de estresse térmico. Os principais índices térmicos foram desenvolvidos para humanos (THOM, 1958) e animais homeotérmicos de diferentes espécies (BUFFINGTON et al., 1981; TAO e XIN, 2003; da SILVA et al., 2015; LEES et al., 2018; WANG et al., 2018). Para nosso conhecimento, ainda não foi desenvolvido um índice térmico aplicado às abelhas. Devido sua importância incontestável como polinizadores de culturas agrícolas e da vegetação nativa (SILVA et al., 2017), destacamos a necessidade de uma ferramenta matemática de fácil acesso, que possa ser utilizada na avaliação do estresse térmico de abelhas operárias em sua atividade de forrageamento.

A proposta deste estudo foi desenvolver o primeiro índice para avaliar as condições de estresse térmico de abelhas durante o forrageamento. Este índice é baseado em respostas termorregulatórias de abelhas sem ferrão da espécie *Melipona subnitida* e engloba as principais variáveis meteorológicas enfrentadas por estes insetos no momento que estão coletando alimento em seu ambiente natural.

MATERIAL E MÉTODOS

Espécie e local

A espécie estudada foi a *Melipona subnitida* (Apidae, Meliponini). O estudo foi conduzido entre os meses de agosto e dezembro de 2017 no Espaço Abelhas Semiárido (Espaço ASA), localizado no campus Mossoró da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (latitude 05°11'S, longitude 37°22'W e altitude de aproximadamente16 m). O tipo climático do local de estudo é o tropical semiárido (tipo BSh), segundo a classificação climática de Köppen.

Temperatura corporal das abelhas

A temperatura corporal das abelhas (T_S , °C) foi mensurada através de uma câmera termográfica (ThermaCAM[®] SC620, Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos) calibrada para as condições de temperatura ambiente e emissividade cuticular de abelhas ($\varepsilon = 0,97$), conforme Stabentheiner e Schmaranzer (1987). Inicialmente, a câmera termográfica foi acoplada a um tripé, permanecendo a uma distância fixa de 0,30 m do alimentador. A T_S foi monitorada das 5:30 às 12:30 horas, em intervalos de 15 minutos. Momentos antes de cada registro de dados, a câmera termográfica foi programada para capturar e armazenar uma imagen térmica a cada 10 segundos, durante três minutos. Estas imagens (Figura 1) foram analisadas com o auxílio do programa Flir ThermaCAM Researcher Pro 2.10 (Flir Systems, Wilsonville, Estados Unidos), sendo discriminadas a temperatura de três regiões corporais: cabeça (T_{CAB}), tórax (T_{TOR}) e abdômen (T_{ABD}).



Figura 1 – Imagem térmica de abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* durante o forrageamento em alimentador artificial.

Análise do ambiente térmico

A temperatura do ar (T_A , °C) e a velocidade do vento (U, m s⁻¹) foram aferidas com um termo-anemômetro de precisão (Lutron, YK-2005AH, Kolkata, India). A umidade relativa do ar (U_R , %) foi aferida por um psicrômetro digital (REED Instruments, 8726, Quebec, Canadá). Estes equipamentos foram instalados no interior do meliponário, próximo às colônias. A radiação solar global (RS, W.m⁻²) foi registrada pela estação meteorológica (Onset Computer Corporation, HOBO RX3003, GSM) do Espaço ASA. A temperatura do globo negro foi mensurada usando um termo-sensor tipo K (marca Salcas, São Paulo, Brasil), o qual foi conectado a um termômetro digital (modelo MT-600, Minipa, São Paulo, Brasil) e inserido no centro de um globo negro (uma esfera oca de cobre com 0,15 m diâmetro) que foi colocado próximo ao alimentador artificial. Utilizando a equação proposta por da Silva et al. (2010), calculou-se a temperatura radiante média (TRM, °C), a partir dos dados de T_A , $U \in T_G$.

Trocas térmicas por convecção

Para determinar as trocas térmicas sensíveis, foi criado um modelo virtual da abelha no qual a cabeça e o tórax foram representados por esferas e o abdômen por um cilindro na posição horizontal. Com base na lei do resfriamento de Newton, as trocas de calor por convecção (H_C , mW) foram estimadas pela equação (adaptada de INCROPERA e WITT, 2014):

$$H_{c} = \left(\rho c_{p} (T_{s} - T_{A}) r_{H}^{-1}\right) A \times 1000$$
(1)

onde ρ é a densidade do ar à temperatura T_A (g m⁻³), c_p é o calor específico do ar (J g⁻¹ °C⁻¹), T_S é a temperatura da superfície corporal das abelhas (°C), T_A é a temperatura do ar (°C), A é a área da superfície corporal (m²) e r_H é a resistência da camada limite à transferência de calor por convecção, a qual pode ser estimada de acordo com da Silva e Maia (2013).

Trocas térmicas por radiação de ondas longas

As trocas de calor por radiação de ondas longas entre as abelhas e seu ambiente (H_R, mW) foram determinadas com base na lei de Stefan-Boltzmann e foram calculadas através da equação adaptada de da SILVA e MAIA (2013):

$$H_R = (\varepsilon_c \sigma (T_S^4 - TRM^4)A) 1000 \tag{2}$$

onde $\sigma = 5,67051 \times 10^{-8}$ W.m⁻².K⁻⁴ é a constante de Stefan-Boltzmann, *TRM* é a temperatura radiante média (°C), T_S é a temperatura corporal da abelha (°C) (em cada região corporal), *A* é a área da superfície corporal (m²) e ε_c é a emissividade cuticular das abelhas.

Radiação solar absorvida

Nem toda radiação solar que atinge a superfície corporal de uma abelha que está forrageando em campo é absorvida. A quantidade de radiação solar que é efetivamente absorvida corresponde ao somatório das frações absorvidas por cada região corporal (cabeça, tórax e abdômen), sendo dada pela equação adaptada de da Silva (2008):

$$R_{ABS} = \left(\left(A_c \left(\left(2 \times \left(F_{CE} \times RS \right) \right) + \left(F_{CC} \times RS \right) \right) \right) A \right) 1000$$
(3)

onde R_{ABS} é a fração da radiação solar de ondas curtas absorvida pela superfície cuticular das abelhas (mW); A_c é a absorbância da superfície cuticular da abelha que, conforme Willmer e Unwin (1981) é igual a 0,91; RS (W.m⁻²) é a radiação solar de ondas curtas mensurada com o pirânometro; A é a área da superfície corporal (m²); F_{CE} e F_{CC} são os fatores de conformação utilizado para esfera (cabeça e tórax) e cilindro horizontal (abdômen), respectivamente. O fator de conformação indica a área que é efetivamente atingida pela radiação solar de ondas curtas. Conforme Monteith e Unsworth (1990), a equação (5) para cilindros é mais adequada para utilização em animais, pois trata-se de cilindros com extremidades semi-esféricas.

$$F_{CE} = \frac{0.25}{sen\beta} \tag{4}$$

$$F_{CC} = \frac{2c \ (1 - \cos^2\beta \cos^2\omega)^{0.5} + \pi r^2}{2sen\beta\pi r(c+2r)}$$
(5)

onde β é o ângulo de elevação da fonte de radiação com respeito à superfície horizontal (graus), ω é o ângulo azimutal (horizontal) do eixo do cilindro com respeito à fonte de radiação (graus), *c* e *r* são o comprimento e o raio do cilindro (abdômen), respectivamente.

Análise dos dados

As seis variáveis resposta das abelhas ao ambiente térmico durante a atividade de forrageamento foram sumarizadas em uma única variável sintética, onde a obtenção do Índice de Estresse Térmico para Abelhas (TSIB) se deu através da análise de componentes principais, conforme descrito por Rencher (2002). Para escolher a quantidade de componentes principais a serem incluídos para determinação do TSIB utilizou-se o critério Kaiser, onde apenas são considerados autovalores superiores a 1 ($\lambda_i > 1$; Tabela 2), os quais explicam a maior parte da variação no conjunto de dados (SAVEGNAGO et al., 2011).

O conjunto de dados do presente estudo apresenta seis variáveis resposta (T_{CAB} , T_{TOR} , T_{ABD} , H_C , H_R e R_{ABS}) a serem resumidas pela análise de componentes principais. O autovetor $e_1' = [e_1, e_2, ..., e_6]$, tendo a matriz de correlação R, está associado ao maior autovalor λ_1 . Então, primeiro componente principal é dado por:

$$\gamma_1 = e_1 T_{CAB} + e_2 T_{TOR} + e_3 T_{ABD} - e_4 H_R + e_5 R_{ABS} + e_6 H_C \tag{6}$$

Dando continuidade, a análise de regressão é uma técnica estatística para estimar as relações entre uma variável dependente e uma ou mais variáveis independentes. Fizemos uma análise de regressão múltipla para obtenção do TSIB, relacionando o componente principal y_1 com as variáveis meteorológicas (*RS*, *U*, *T*_A, *UR* e *T*_G). Para poder entrar no modelo (TSIB), uma variável meteorológica precisou apresentar um valor de probabilidade altamente significativo (*P* < 0,001) e, para avaliar a performance preditiva do modelo, o coeficiente de determinação (*R*²) foi utilizado. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa STATISTICA (STATISTICA 7, Stat Software Inc., Tulsa, Oklahoma).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das variáveis meteorológicas, temperaturas corporais e mecanismos termorregulatórios utilizados por abelhas sem ferrão *Melipona subnitida* são mostrados na Tabela 1. As médias de *RS* e *U* foram, respectivamente, 829,39 W.m⁻²e 2,15 m.s⁻¹, com amplitude elevada durante o estudo (23-1279 W.m⁻² e 0,08-7,06 m.s⁻¹). T_A e T_G apresentaram valores médios elevados e uma variação térmica expressiva de 13,10 °C e 26,80 °C, respectivamente. A região torácica teve uma temperatura maior que as das demais regiões corporais. As temperaturas médias na cabeça e abdômen apresentaram diferenças mínimas entre si.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis meteorológicas, temperaturas corporais, transferências de calor por convecção e radiação de ondas longas, além da radiação solar absorvida por abelhas *Melipona subnitida* no bioma Caatinga.

Variáveis	Média	Mínimo	Máximo
$RS(W.m^{-2})$	829,39±7,78	23,00	1279,00
$U(m.s^{-1})$	$2,15\pm0,03$	0,08	7,06
$T_A(^{\circ}\mathrm{C})$	30,50±0,06	22,70	35,80
$U_R(\%)$	50,16±0,22	33,00	76,20
$T_G(^{\circ}\mathrm{C})$	43,23±0,12	28,80	55,60
$T_{CAB}(^{\circ}\mathrm{C})$	35,41±0,06	26,40	43,50
T_{TOR} (°C)	39,81±0,05	30,70	45,90
$T_{ABD}(^{\circ}\mathrm{C})$	35,60±0,07	25,70	44,00
$H_R(\mathbf{mW})$	-18,83±0,34	-57,21	29,04
$R_{ABS}(\mathrm{mW})$	48,24±0,34	6,60	73,09
$H_C(\mathbf{mW})$	57,81±0,51	1,30	139,17

 R_{ABS} apresentou média de 48,24 mW, alcançando um valor máximo de 73,09 mW quando os níveis de *RS* estavam elevados. H_C funcionou como um mecanismo de resfriamento corporal durante todas as observações, alcançando um valor máximo de 139,17 mW. Diferentemente, H_R funcionou como um mecanismo para perda e para ganho de calor, mas, em maior parte, recebendo calor do ambiente. T_G é usada para calcular a *TRM*, assim, elevadas T_G ocasionam elevadas *TRM*. Em regiões de clima tropical, a *TRM* permanece mais elevada que a temperatura superficial dos animais durante a maior do dia (da SILVA et al., 2010). Estas condições térmicas evidenciaram a elevada quantidade de calor recebido do ambiente por H_R .

Apenas um componente principal apresentou um autovalor > 1 (λ_1 = 3,737619), explicando 62.29 % da variância total (Tabela 2). Segundo Rencher (2002), o primeiro componente principal explica a porcentagem mais alta da variância total, o segundo componente principal explica a segunda, e assim por diante, até que toda a variância tenha sido explicada. O diagnóstico visual do gráfico *scree plot* (Figura 2A) também foi utilizado para nossa tomada de decisão ao incluir apenas o primeiro componente principal (BROWN, 1988). Todas as variáveis se correlacionaram positivamente com o primeiro componente principal, exceto H_R , o que já era esperado, pois, neste estudo, a maioria dos seus valores foram apresentados como negativo (Figura 2B).

Tabela 2 – Resultados dos autovalores e variância total explicada pelos componentes principais extraídos na análise.

Componentes	Autovalaras	Variância total (%)	Variância total	
Componentes	Autovalores	v ariancia totar (70)	acumulada (%)	
1	3,737619	62,29364	62,2936	
2	0,802138	13,36896	75,6626	
3	0,685053	11,41754	87,0802	
4	0,588310	9,80516	96,8853	
5	0,106222	1,77037	98,6557	
6	0,080659	1,34432	100,00	

O autovetor associado ao primeiro e maior componente principal é descrito como:

$$e_1 = \begin{pmatrix} 0,483783\\ 0,478637\\ 0,485271\\ -0,362043\\ 0,310807\\ 0,271471 \end{pmatrix}$$

(7)

Utilizando este autovetor como os coeficientes das seis variáveis resposta (T_{CAB} , T_{TOR} , T_{ABD} , H_C , H_R e R_{ABS}), o componente principal é dado pela seguinte equação:

$$\gamma_1 = 0,483783 T_{CAB} + 0,478637 T_{TOR} + 0,485271 T_{ABD} - 0,362043 H_R + 0,310807 R_{ABS} + 0,271471 H_C$$
(8)

O resultado de γ_1 para cada observação foi, então, aplicado em uma análise de regressão múltipla como uma variável dependente, relacionando-a com as variáveis meteorológicas (independentes). O índice de estresse térmico para abelhas (TSIB) é apresentado abaixo, onde todas as variáveis meteorológicas entraram no modelo, o qual apresentou um elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,834$):

$$TSIB = 9,43 + 0,018 RS + 4,895 U - 0,856 T_A + 0,291 UR + 1,562 T_G$$
(9)



Figura 2 - Análise de componentes principais. A – Plotagem do número de componentes principais e autovalores das variáveis estudadas (*scree plot*). B – Análise de componentes principais das temperaturas corporais (T_{CAB} , T_{TOR} e T_{ABD}), transferências de calor por convecção (H_C) e radiação de ondas longas (H_R) e radiação solar absorvida (R_{ABS}) por abelhas *Melipona subnitida*.

O TSIB apresentou correlações significativas com as variáveis meteorológicas observadas no presente estudo, onde os maiores coeficientes foram encontrados com T_G e RS, e medianos com a U, T_A e UR, sendo que esta última foi negativa (Tabela 3). A matriz apresentada na Tabela 4 também mostra correlações significativas entre o TSIB e as temperaturas corporais e os mecanismos de termorregulatórios determinados nas abelhas. Os valores foram maiores que 0,700, exceto para R_{ABS} , que apresentou uma

correlação de 0,663. Além disto, as variáveis meteorológicas (Tabela 3) e termorregulatórias (Tabela 4) correlacionaram significativamente entre si, respectivamente.

Tabela 3 – Coeficientes de correlação entre as variáveis meteorológicas encontradas durante o estudo e o TSIB.

Variáveis	RS	U	TA	UR	TSIB
RS					0,754*
U	0,249*				0,577*
T_A	0,735*	0,171*			0,566*
U_R	-0,626*	-0,251*	-0,800*		-0,424*
T_G	0,784*	0,222*	0,839*	-0,632*	0,758*

RS: Radiação Solar; T_A : Temperatura do Ar; *UR*: Umidade Relativa do Ar; *U*: velocidade do vento; T_G : Temperatura do Globo Negro.

*P<0.01

Tabela 4 – Matriz de correlação entre as temperaturas corporais, transferências de calor por convecção e radiação de ondas longas, além da radiação solar absorvida por abelhas *Melipona subnitida* utilizados na análise de componentes principais e o TSIB.

Variáveis	T_{CAB}	T_{TOR}	T_{ABD}	H_R	H_C	TSIB
TCAB						0,765*
T_{TOR}	0,903*					0,755*
T_{ABD}	0,917*	0,895*				0,775*
H_R	-0,539*	-0,534*	-0,573*			-0,767*
R_{ABS}	0,471*	0,442*	0,464*	-0,356*		0,663*
H_C	0,387*	0,398*	0,383*	0,315*	0,210*	0,709*

 T_{CAB} : Temperatura da Cabeça; T_{TOR} : temperatura do Tórax; T_{ABD} : temperatura do Abdômen; H_C : Perda de Calor Convectivo; H_R : Fluxo de Calor por Ondas Longas; R_{ABS} : Radiação de Ondas Curtas Absorvida. *P < 0.01

As Figuras 3 e 4 mostram as médias da temperatura corporal mensuradas nas diferentes partes do corpo e dos mecanismos termorregulatórios, respectivamente, em cada um dos níveis de TSIB que nós estabelecemos. Verificamos que as temperaturas, independente da região corporal, aumentaram progressivamente com o aumento dos níveis de TSIB. Entretanto, a diferença entre a T_{TOR} e a temperatura nas demais regiões

do corpo diminuiu com o aumento do nível de TSIB, sugerindo que, em condições térmicas de estresse severo, conforme Church (1960b), parte do calor corporal foi transferido por condução do tórax para as demais regiões corporais (abdômen e cabeça).

Verificamos também um aumento da H_C e R_{ABS} em função do aumento de TSIB, mas a R_{ABS} parou de crescer quando o TSIB estava entre 91 e 105. H_R se manteve próximo a zero em baixos níveis de TSIB, mas também aumentou seus valores (negativamente) quando os níveis de TSIB estavam altos. Com base nestes resultados (Figura 4), verificamos que as abelhas mantiveram o equilíbrio entre estes mecanismos termorregulatórios quando o TSIB estava <75. Em contrapartida, em níveis de TSIB >105, as abelhas necessitaram ativar mecanismos de resfriamento corporal, neste caso a convecção, em uma tentativa de reverter os efeitos causados pelo desafio térmico. Church (1960a) afirmou que o resfriamento convectivo pode chegar a 80% de toda perda de calor corporal em situações de estresse térmico por calor. Levando em consideração os mecanismos de termorregulação no presente estudo, a convecção foi responsável toda a perda de calor, independente do nível de TSIB.



Figura 3 – Temperatura corporal de abelhas *Melipona subnitida* nas diferentes regiões corporais analisadas e em função do Índice de Estresse Térmico para Abelhas (TSIB). No detalhe estão os três intervalos para aplicação prática do TSIB.

Inúmeros índices para quantificar o estresse térmico sobre organismos vivos foram encontrados na literatura. Há, dentre eles, índices para humanos (THOM, 1958), bovinos (BUFFINGTON et al., 1981; da SILVA et al., 2015; LEES et al., 2018) e aves domésticas (TAO e XIN, 2003). No entanto, segundo Wang et al. (2018), algumas limitações foram encontradas em alguns destes índices, tais como o desenvolvimento do índice para uma espécie e a aplicação equivocada para outras, a consideração de poucas variáveis meteorológicas e também a ausência, em alguns deles, do relacionamento das variáveis fisiológicas com as abióticas.

O TSBI é o primeiro índice para avaliação do estresse térmico em abelhas, com foco nas operárias durante o forrageamento, ou seja, abelhas expostas a radiação solar. Com base no aumento progressivo da temperatura nas três regiões corporais, principalmente a T_{TOR} (Figura 3), e no aumento crescente do ganho de calor do ambiente com a consequente elevação do resfriamento corporal convectivo (Figura 4), a qual é necessário em condições extremas de estresse térmico, três intervalos para aplicação prática do TSIB são sugeridos: <75 ausência de estresse, 76 à 105 estresse moderado e >105 estresse severo.



Figura 4 – Transferências de calor por convecção (H_C) e radiação de ondas longas (H_R), além da radiação solar absorvida (R_{ABS}) por abelhas *Melipona subnitida* em função do Índice de Estresse Térmico para Abelhas (TSIB). No detalhe estão os três intervalos para aplicação prática do TSIB.

Um modelo matemático para predição das condições térmicas que as abelhas operárias enfrentam durante sua atividade forrageamento foi desenvolvido. Este modelo foi denominado de Índice de Estresse Térmico para Abelhas (TSIB), o qual leva em consideração cinco variáveis que compõem o ambiente térmico: radiação solar de ondas curtas (radiação global), radiação solar de ondas longas (temperatura do globo negro), velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar.

O TSIB apresentou uma forte relação com as temperaturas corporais e mecanismos termorregulatórios das abelhas. Os níveis de estresse térmico de abelhas durante o forrageamento com base no TSIB foram categorizados: <75 ausência de estresse, 76 à 105 estresse moderado e >105 estresse severo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto maior for distância entre a colmeia e a fonte de alimento, menor é o número de abelhas *Melipona subntida* forrageando. A temperatura corporal destas abelhas é influenciada pela distância e, em maior parte, pelas condições meteorológicas do bioma Caatinga. O equilíbrio térmico com o ambiente não é alcançado em maiores distâncias, onde as abelhas recebem um excesso de calor ambiental. O equilíbrio térmico é alcançado quando a fonte alimento é próxima às colônias. Um modelo matemático para predição das condições térmicas que abelhas enfrentam durante o forrageamento foi desenvolvido. Assim, sugere-se menosres distâncias entre as colmeias de *Melipona subntida* e alimentadores artificiais contendo solução de sacarose para provimento de alimento energético em períodos de escassez de recursos florais no bioma Caatinga.

7. REFERÊNCIAS

ABOU-SHAARA, H.F., OWAYSS, A.A., IBRAHIM, Y.Y., N. K. BASUNY. A review of impacts of temperature and relative humidity on various activities of honey bees. **Insect. Soc.**, v. 64, n. 4, pp 455-463, 2017.

ACOSTA, AL; GIANNINI, TC; IMPERATRIZ-FONSECA, VL; SARAIVA, AM. **Mudanças climáticas na Caatinga com ênfase no Rio Grande do Norte: breve análise e síntese**. In: IMPERATRIZ-FONSECA, VL, KOEDAM D AND HRNCIR, M. eds. A abelha Jandaíra no passado, no presente e no future. Edufersa, Mossoró, p.185-199, 2017.

BASARI, N; RAMLI, SN; KHAIRI, NSM. Food Reward and Distance Influence the Foraging Pattern of Stingless Bee, *Heterotrigona itama*. **Insects**, v. 9, n. 4, p. 138, 2018.

BIESMEIJER, J.C.; RICHTER, J.A.; SMEETS, M.J.P.; SOMMEIJER, M.J. Niche differentiation in nectar-colleting strangles bees: the influence of morphology, floral choice and interference competition. **Ecological Entomology**, v.24, p.380-388, 1999.

BROWN, S.D., 1988. Chemometrics: a textbook. In: D.L. MASSART, B.G.M. VANDEGINSTE, S.N. DEMING, Y. MICHOTTE AND L. KAUFMAN, Elsevier: Amsterdam, Chemometrics, v. 2, p. 298–299, 1988.

BRUENING, H. A Jandaíra. Mossoró: Guimarães Duque, 2001.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D. Black Globe-Humidity Index (BGHI) as Comfort Equation for Dairy Cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 711–714, 1981.

CARMO FILHO, F.; OLIVEIRA, O. F. Mossoró: um município do semi-árido nordestino, caracterização climática e aspecto florístico. Mossoró: ESAM, 1995. 62p. (Coleção Mossoroense, Série B).

CASEY, T. M. Biophysical Ecology and Heat Exchange in Insects. American Zoologist, v. 32, n. 2, p. 225-237, 1992.

CHURCH, N. S. Heat Loss and the Body Temperatures of Flying Insects: II. Heat conduction within the body and its loss by radiation and convection. Journal of **Experimental Biology**, v. 37, n. 1, p. 186-212, 1960a.

CHURCH, N. S. Heat Loss and the Body Temperatures of Flying Insects: I. Heat loss by evaporation of water from the body. **Journal of Experimental Biology**, v. 37, n. 1, p. 171-185, 1960b.

COOPER, P. D.; SCHAFFER, W. M.; BUCHMANN, S. L. Temperature regulation of honey bees (*Apis mellifera*) foraging in the Sonoran desert. Journal of Experimental Biology, v. 114, n. 1, p. 1-15, 1985.

CONTRERA, F. A. L.; CORDEIRO, H. K. C.; TEIXEIRA, J. C. S.; LEÃO, K. L.; VEIGA, J. C.; MENEZES, C. A scientific note on the use of external feeders for the Amazonian stingless bee *Melipona flavolineata* (Apidae, Meliponini), Journal of Apicultural Research, v. 54, n. 2, p. 77-80, 2015.

COUVILLON MJ, PEARCE FCR, ACCLETON C, FENSOME KA, QUAH SKL, TAYLOR EL. Honey bee foraging distance depends on month and forage type. **Apidologie**, v. 46, p. 61–70, 2014.

DANTAS, M.R.T. Thermogenesis in stingless bees: an approach with emphasis on brood's thermal contribution. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 4, n. 4, p.101-108, 2016.

da SILVA, R. G. **Biofísica Ambiental: Os animais e seu ambiente**. FUNEP: Jaboticabal, 2008.

da SILVA, R. G.; GUILHERMINO, M. M.; DE MORAIS, D. A. E. F. Thermal radiation absorbed by dairy cows in pasture, **International Journal of Biometeorology**, v. 54, n. 1, p. 5–11, 2010.
da SILVA, R.G.; MAIA, A.S.C. **Principles of animal biometeorology**. Springer: New York, 2013.

da SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C.; MACEDO COSTA, L. L. Index of thermal stress for cows (ITSC) under high solar radiation in tropical environments. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, n. 5, p. 551-559, 2015.

de SOUZA, J. B. F.; de QUEIROZ, J. P. A. F.; dos SANTOS, V. J. S.; DANTAS, M. R. T.; de LIMA, R. N.; de OLIVEIRA LIMA, P.; MACEDO COSTA, L. L. Cutaneous evaporative thermolysis and hair coat surface temperature of calves evaluated with the aid of a gas analyzer and infrared thermography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 154, n. 11, p. 222-226, 2018.

DEUTSCH, C.A.; TEWKSBURY, J.J.; HUEY, R.B.; SHELDON, K.S.; GHALAMBOR, C.K.; HAAK, D.C.; MARTIN, P.R. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. **Proc. Natl. Acad. Sci.**, v.105, p.6668–6672 2008.

DOMINGOS, H. G. T.; SOMBRA, D. S. ; SANTOS, R. G.; GRAMACHO, K. P.; GONÇALVES, L. S. Surface Temperature and Heat Transfer between Body Regions of Africanized Honeybees (*Apis mellifera* L.) in Hives under Sun and Shade Conditions in the Northeastern Semi-arid Region of Brazil. Journal of Agricultural Science and Technology A, v.8, p. 28-35, 2018.

GIANNINI, T. C., A. L. ACOSTA, F. ZANELLA, T. M. FRANCOY, A. M. SARAIVA, AND V. L. IMPERATRIZ-FONSECA. Current and future geographical distribution of jandaíra: preliminary analysis, pp. 93–96, Anais do X Encontro sobre Abelhas em Ribeirão Preto, 2012.

HEINRICH, B. Thermoregulation in Endothermic Insects. Science, v. 185, n. 4153, p. 747-756, 1974.

HEINRICH, B. The hot-blooded insects. Springer Verlag: Berlin, 1993.

HILÁRIO, S. D.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; KLEINERTGIOVANNINI, A. Responses to climatic factors by foragers of *Plebeia pugnax* Moure (in litt) (Apidae, Meliponinae). **Revista Brasileira de Biologia**, v. 61, n. 02, p. 191-196, 2001.

HOFFMANN, A.A.; CHOWN, S.L.; CLUSELLA-TRULLAS, S. Upper thermal limits in terrestrial ectotherms: how constrained are they? **Funct. Ecol.**, v.27, p.934–949, 2013.

INCROPERA, F.P.; WITT, D.P. Fundamentals of heat and mass transfer, 7^a Ed. New York: John Willey & Sons, 2014.

IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.

KOFFLER, S.; MENEZES, C.; MENEZES, P. R.; KLEINERT, A. M. P.; IMPERATRIZ-FONSECA, V L.; POPE, N.; JAFFÉ, R. Temporal Variation in Honey Production by the Stingless Bee *Melipona subnitida* (Hymenoptera: Apidae): Long-Term Management Reveals its Potential as a Commercial Species in Northeastern Brazil. Journal of Economic Entomology, v. 108, n. 3, p. 858–867, 2015.

KOVAC, H.; STABENTHEINER, A.; SCHMARANZER, S. Thermoregulation of water foraging honeybees—Balancing of endothermic activity with radiative heat gain and functional requirements. **Journal of Insect Physiology**, v.56, p.1834–1845, 2010.

KOVAC, H.; STABENTHEINER, A. Thermoregulation of foraging honeybees on flowering plants. **Ecol. Entomol.**, v.36, p. 686–699, 2011.

KOVAC, H.; STABENTHEINER, A.; BRODSCHNEIDER, R. What do foraging wasps optimize in a variable environment, energy investment or body temperature? **J Comp Physiol A**, v.201, p.1043–1052, 2015.

KOVAC, H.; KÄFER, H.; STABENTHEINER, A. The energetics and thermoregulation of water collecting honeybees. **Journal of Comparative Physiology A**, v. 204, n. 9-10, p. 783-790, 2018a.

KOVAC, H.; STABENTHEINER, A.; BRODSCHNEIDER, R. Foraging strategy of wasps – optimisation of intake rate or energetic efficiency? Journal of Experimental Biology, v. 221, n. 14, p. jeb174169, 2018b.

LEES, J. C.; LEES, A. M.; GAUGHAN, J. B. Developing a heat load index for lactating dairy cows. **Animal Production Science**, v. 58, n. 8, p. 1387-1391 2018.

MAIA-SILVA, C.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; HRNCIR, M. Environmental windows for foraging activity in stingless bees, *Melipona subnitida* Ducke and *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (Hymenoptera: Apidae: Meliponini). **Sociobiology**, v. 61, n. 4, p. 378-385, 2014.

MAIA-SILVA, C.; HRNCIR, M.; SILVA, C. I.; IMPERATRIZ-FONSECA, V. L. Survival strategies of stingless bees (*Melipona subnitida*) in an unpredictable environment, the Brazilian tropical dry. **Apidologie**, v. 46, n. 5, p. 631–643, 2015.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of environmental physics**, 2^a ed. Arnold: London, 1990.

OLIVEIRA, F. L.; DIAS, V. H. P.; COSTA, E. M.; FILGUEIRA, M. A.; SOBRINHO, J. E. Influência das variações climáticas na atividade de vôo das abelhas jandaíras *Melipona subnitida* Ducke (Meliponinae). **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 3, p. 598-603, 2012.

OLIVEIRA, S.E.O.; COSTA, C.C.M.; SOUZA JR, J.B.F.; QUEIROZ, J.P.A.F; MAIA, A.S.C.; COSTA, L.L.M. Short-wave solar radiation level willingly tolerated by lactating Holstein cows in an equatorial semi-arid environment. **Tropical Animal Health and Production**, v. 46, n. 8, p. 14135–1417, 2014.

OYEN, K.J.; GIRI, S.; DILLON, M.E. Altitudinal variation in bumble bee (Bombus) critical thermal limits. Journal of Thermal Biology, v. 59, n. 5, p. 52-57, 2016.

PAVLOVIĆ, D.; VASILJEVIĆ, D.; SALATIĆ, B.; LAZOVIĆ, V.; DIKIĆ, G.; TOMIĆ, L.; ĆURČIĆ, S.; MILOVANOVIĆ, P.; TODOROVIĆ, D.; PANTELIĆ, D. V. Photonic structures improve radiative heat exchange of *Rosalia alpina* (Coleoptera: Cerambycidae). Journal of Thermal Biology, v. 76, n. 6, p. 126-138, 2018.

RASHAMOL, V. P.; SEJIAN, V.; BAGATH, M.; KRISHNAN, G.; ARCHANA, P. R.; BHATTA, R. Physiological adaptability of livestock to heat stress: an updated review. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 6, n. 4. p. 62-71, 2018.

RENCHER, A.C. Methods of multivariate analysis, John Wiley & Sons: New York, 2002.

ROBERTS, S. P.; HARRISON, J. F. Mechanisms of thermoregulation in flying bees. American Zoologist, v. 38, n. 3, p. 492-502, 1998.

ROBERTS, S. P. Effects of flight behaviour on body temperature and kinematics during inter-male mate competition in the solitary desert bee *Centris pallida*. **Physiological Entomology**, v. 30, n. 2, p. 151-157, 2005.

ROUBIK, D. W. Ecology and natural history of tropical bees. Cambridge: Tropical Biology Series, 1989.

SAVEGNAGO, R.P., CAETANO, S.L., RAMOS, S.B., NASCIMENTO, G.B., SCHMIDT, G.S., LEDUR, M.C. AND MUNARI, D.P. Estimates of genetic parameters, and cluster and principal components analyses of breeding values related to egg production traits in a White Leghorn population, **Poultry Science**, v. 90, n. 10, p. 2174–2188, 2011.

SILVA, A.C.; PINTO, R.S.; CONTRERA, F.A.L.; ALBUQUERQUE, P.M.C; RÊGO, M.M.C. Foraging Distance of *Melipona subnitida* Ducke (Hymenoptera: Apidae). **Sociobiology**, v.61, p.494-501, 2014.

SILVA, M. A.; FERREIRA, N. S.; TEIXEIRA-SOUZA, V. H. S.; MAIA-SILVA, C.; OLIVEIRA, F. A.; HRNCIR, M. On the thermal limits for the use of stingless bees as pollinators in commercial greenhouses, **Journal of Apicultural Research**, v. 56, n. 1, p. 81-90, 2017.

SOBRINHO, J. E.; PEREIRA, V. C.; OLIVEIRA, A D.; SANTOS, W. O.; SILVA, N. K. C.; MANIÇOBA, R. M. Climatologia da precipitação no município de Mossoró-RN. Período: 1900-2010. In: XVII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 2011, Guarapari-ES.

STABENTHEINER, A.; SCHMARANZER, S. Thermographic determination of body temperatures in honey bees and hornets: calibration and applications. **Thermology**, v.2, p.563–572, 1987.

STABENTHEINER A; KOVAC H; HETZ SK; KÄFER H; STABENTHEINER G. Assessing honeybee and wasp thermoregulation and energetics – New insights by combination of flow through respirometry with infrared thermography. **Termochimica Acta**, v.534, p.77-86, 2012.

STABENTHEINER, A.; KOVAC, H. Energetic Optimisation of Foraging Honeybees: Flexible Change of Strategies in Response to Environmental Challenges. **PLoS ONE**, v.9, n.8, e105432, 2014.

STABENTHEINER, A, KOVAC, H. Honeybee economics: optimisation of foraging in a variable world. **Sci. Report.**, v. 6, p. 28339, 2016.

SWITANEK, M.; CRAILSHEIM, K.; TRUHETZ, H.; BRODSCHNEIDER, R. Modelling seasonal effects of temperature and precipitation on honey bee winter mortality in a temperate climate. **Science of The Total Environment**, v. 579, n. 1, p. 1581-1587, 2017.

TAO, X.; XIN, H. Acute synergistic effects of air temperature, humidity, and velocity on homeostasis of market-size broilers. **Transactions of the ASAE**, v. 46, n. 2, 491-500, 2003.

TATTERSAL, G. J. Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology, v.202, p. 78-98, 2016.

THOM, E. C. The discomfort index. Weatherwise, v. 12, n. 2, p. 57-60, 1959.

UNDERWOOD, B. A. Thermoregulation and Energetic Decision-Making by the Honeybees *Apis Cerana, Apis Dorsata* and *Apis Laboriosa*. Journal of Experimental Biology, v. 157, n. 3, p. 19-34, 1991.

WILLMER, P. G.; UNWIN, D. M. Field analyses of insect heat budgets: reflectance, size and heating rates. **Oecologia**, v. 50, n. 2, p. 250-255, 1981.

WILLMER, P. G.; STONE, G. N. Behavioral, ecological, and physiological determinants of the activity patterns of bees. Advances in the Study of Behavior, v. 34, n. 34, p. 347-466, 2004.

WANG, X.; GAO, H.; GEBREMEDHIN, K. G.; BJERGE, B. S.; OS, J. V.; TUCKERF, C B.; ZHANG, G. A predictive model of equivalent temperature index for dairy cattle (ETIC). Journal of Thermal Biology, v. 76, n. 6, p. 165-170, 2018.

APÊNDICE A – CORRELAÇÕES ENTRE AS TEMPERATURAS CORPORAIS E TEMPERATURA E RADIAÇÃO SOLAR NAS DIFERENTES DISTÂNCIAS ENTRE AS COLMEIAS E O ALIMENTADOR ARTIFICIAL

----- Distance= 15m -----

The CORR Procedure

2 With Variables: T_A RS 3 Variables: Cabeca Torax Abdomen

Simple Statistics

Pearson Correlation Coefficients, N = 980Prob > |r| under H0: Rho=0

	T_{CAB}	T_{TOR}	T_{ABD}
$T_A \\ T_A$	0.84306	0.81794	0.88090
	<.0001	<.0001	<.0001
RS	0.76810	0.73893	0.79738
RS	<.0001	<.0001	<.0001

----- Distance= 50m -----

The CORR Procedure

2 With Variables: T_A RS 3 Variables: Cabeca Torax Abdomen

Pearson Correlation Coefficients, N = 1098Prob > |r| under H0: Rho=0

	T_{CAB}	T_{TOR}	T_{ABD}
$T_A T_A$	0.80494	0.75012	0.81550
	<.0001	<.0001	<.0001
RS	0.72337	0.66948	0.72975
RS	<.0001	<.0001	<.0001

----- Distance= 100m ------

The CORR Procedure

2 With Variables: T_A RS 3 Variables: Cabeca Torax Abdomen

Pearson Correlation Coefficients, N = 348 Prob > $|\mathbf{r}|$ under H0: Rho=0

	T_{CAB}	T_{TOR}	T_{ABD}
$T_A \\ T_A$	0.88728	0.83042	0.88522
	<.0001	<.0001	<.0001
RS	0.78978	0.74476	0.80062
RS	<.0001	<.0001	<.0001

ANEXO A - MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BIOMA CAATINGA COM BASE NO AUMENTO DA TEMPERATURA



Mapa evidenciando as faixas de aumento relativo da temperatura média anual entre a condição atual e 2080 na área de predominância do bioma Caatinga em graus centígrados (°C). A escala é relativa, portanto, uma cidade qualquer localizada na faixa mais escura (cor carmim) onde atualmente a temperatura média é de 25°C terá para 2080 o aumento de 4,0 a 4,6°C; ou seja, a temperatura média anual nesta cidade em 2080 estará entre 29,0 e 29,6°C. As cidades pontuadas possuem 50 mil ou mais habitantes.

MAPA 1

MAPA 1 - Mapa das mudanças climáticas no bioma Caatinga com base no aumento da temperatura.







MAPA 2 - Mudanças climáticas no bioma Caatinga com base na redução da precipitação pluviométrica.

MAPA