



Universidade Federal do Maranhão
Centro de Ciências Biológicas e da
Saúde
Programa de Pós-Graduação em Ciências da Saúde
Mestrado



MARCELO HENRIQUE SOUSA SILVA JUNIOR

**MODELO COMPUTACIONAL DE PREVISÃO DO NÚMERO DE GERAÇÕES DO
CARRAPATO BOVINO *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* NO BRASIL**

São Luís (MA)

2024

**MODELO COMPUTACIONAL DE PREVISÃO DO NÚMERO DE GERAÇÕES DO
CARRAPATO BOVINO *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Ciências da Saúde da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências da Saúde.

Orientador: Prof. Dr. Livio Martins Costa Junior

Co-orientadora: Prof. Dra. Holly Gaff

São Luís (MA)

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Sousa Silva Junior, Marcelo Henrique.

MODELO COMPUTACIONAL DE PREVISÃO DO NÚMERO DE
GERAÇÕES

DO CARRAPATO BOVINO *Rhipicephalus Boophilus microplus* NO
BRASIL / Marcelo Henrique Sousa Silva Junior. - 2024.

57 p.

Coorientador(a) 1: Holly Denise Gaff.

Orientador(a): Livio Martins Costa Junior.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências da
Saúde/ccbs, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, Ma. Ppgcs,
Sala 01, Integrado, 2024.

1. Biomas. 2. Fase Não Parasitária. 3. Modelagem. I. Denise Gaff,
Holly. II. Martins Costa Junior, Livio. III. Título.

MARCELO HENRIQUE SOUSA SILVA JUNIOR

**MODELO COMPUTACIONAL DE PREVISÃO DO NÚMERO DE GERAÇÕES DO
CARRAPATO BOVINO *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* NO BRASIL**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em
Ciências da Saúde da Universidade Federal do Maranhão
como requisito para obtenção do título de Mestre em
Ciências da Saúde.

Aprovada em 26/11/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Livio Martins Costa Junior

Hermes Ribeiro Luz

1º Examinador

Caio Pavão Tavares

2º Examinador

Dauana Mesquita Sousa

3º Examinador

“Nobody said it was easy. Never let anyone tell you that you can't”. “Vó, estou conseguindo”
Coldplay. Christopher Gardner. A autoria própria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, segundamente minha família, minha namorada e amigos, incluindo meu orientador e coorientadora, ou seja, pessoas que fizeram esse trabalho ganhar enormes proporções, a Deus, família e minha namorada que me apoiam em todas as decisões da minha vida, tanto no sentido acadêmico quanto no sentido pessoal, agradeço especificamente as pessoas enviadas por Deus para melhorar minha vida, meus pais, meu irmão, minha vó e minha namorada, que nos momentos mais difíceis da vida eles estiveram lá. Agradeço ao meu orientador, professor Livio, e coorientadora, professora Holly Gaff, por ter confiado em mim para desenvolvimento desse projeto que só tende a crescer academicamente, me sinto grato pela família LCP e parceiras do professor Livio, através destas consegui me encontrar na ciência e fazer ciência, fazer a ciência na saúde única, meu orientador sempre se mostrou presente em ajudar no projeto e em todas nossas reuniões eu consegui absorver muito conhecimento, assim como nas reuniões com minha coorientadora que tira seu tempo toda sexta feira, em fuso horário diferente do Brasil, para tirar minhas dúvidas sobre modelagem computacional. Agradeço a acarologia, laboratório onde aprendo diariamente sobre carrapatos, a meus amigos que fiz nesse laboratório, desde a iniciação científica até a pós graduação, todos são ótimos profissionais, agradecimento ao programa de ciências da saúde por todas as disciplinas ministradas que despertaram meu pensamento crítico quanto ao mundo, agradeço a Dauana que me apoiou desde o início no mestrado e por todas as dicas que me deu durante o processo. Agradeço aos meus amigos da graduação, ao grupo Ecoputos da biologia UFMA, aos amigos da minha turma de mestrado e todos aqueles que de alguma forma fizeram parte desse processo. Agradeço minha vó que está no céu e que sempre me incentivou a estudar e ser honesto, agradeço a minha mãe e pai que sempre batalhou para dar o melhor para eu e meu irmão, agradeço a minha namorada Ana Beatriz, minha sogra, meu cunhado, meu sogro que seguraram minha mão em todos os momentos de aflições, agradeço ao meu médico que através da medicina pôde fazer mágica e em conclusão agradeço a Deus por ser os médicos dos médicos e ter proporcionado esse privilégio de viver se sentir sensações únicas com a ciência e com a vida pessoal. Mãe, pai, Vó, Gustavo, Ana Beatriz, estamos conseguindo vencer, essa etapa é pra vocês!

RESUMO

Rhipicephalus (Boophilus) microplus, é um ectoparasito de grande importância para a saúde animal. Fatores abióticos, como temperatura interfere em diversas fases de vida desse parasito. Isso pode refletir na quantidade de gerações anuais deste carrapato nas diferentes regiões do Brasil. Sua alta prevalência, além da transmissão de patógenos, como *Babesia bovis*, *Babesia bigemina* e *Anaplasma marginale*, compromete a produção da carne, leite e couro. Com isso, o Brasil perde ~ 3,2 bilhões de dólares/ano, comprometendo a economia local. Diante dessa problemática, a predição da biologia populacional do carrapato em sua fase não parasitária por modelagem computacional é uma alternativa promissora para auxiliar no controle parasitário. O objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo de previsão do número de gerações anuais de *R. (B.) microplus* no Brasil. Por meio da busca de dados sobre a biologia da fase não parasitária do carrapato, foi realizada uma revisão bibliográfica nas bases PubMed, Scielo e Google Scholar. Posteriormente, equações de previsão por modelos de regressões não lineares polinomiais de grau 3 foram realizadas, tendo como dados de temperatura a variável preditora e os parâmetros biológicos período de pré-postura e incubação de ovos as variáveis respostas, considerando $R^2 \geq 0,70$ e $p < 0,05$, significativos. A capacidade de previsão do modelo foi avaliada a partir da comparação com dados da biologia de diferentes estudos presente na literatura. Posteriormente, o Brasil foi dividido em 136 quadrantes de iguais tamanhos (resolução $2,5^\circ \times 2,5^\circ$) pelo método exponencial geoestatístico e os dados climáticos (2020 – 2024) de uma estação meteorológica de cada quadrante acessado através do banco de dados AGRITEMPO, serviram de entrada para o modelo de previsão do número de gerações anuais do carrapato. A robustez estatística foi avaliada através da raiz do erro quadrático médio (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e coeficiente de determinação (R^2). Como resultado, as equações matemáticas de previsão para o período de pré-postura ($R^2 > 0,70$) e incubação ($R^2 > 0,80$) apresentaram correlação negativa ($r < 0$) em função das variáveis climáticas e obtiveram, RMSE= 2,67 e 11,80, respectivamente. Estatisticamente, as previsões do modelo diferem dos valores reais em cerca de 1,93 dias (MAE) para período de pré-postura e 9,21 dias (MAE) para incubação de ovos. A partir da previsão do período de pré-postura e incubação, associado ao período de maturação larval e fase parasitária (22 dias), a estimativa do número de gerações anuais das regiões do Brasil foi entre as mínimas de 2,92 (região Sul) e máximas de 6,18 gerações (região Norte), evidenciando o maior número de gerações em regiões equatoriais, de maior temperatura. O bioma Amazônia obteve o maior número de gerações dentre os biomas, com média de $5,46 \pm 0,29$ gerações anuais. As previsões do modelo diferem dos valores reais em cerca de 0,378 gerações (MAE), com $R^2 = 0,71$. Esses resultados de previsão auxiliam no desenvolvimento de novos critérios para o controle estratégico de carrapato, como alteração do sistema de manejo, visto que o conhecimento da dinâmica populacional do parasito no pasto são fatores limitantes para identificação de picos de carrapatos e consequentemente, um controle parasitário eficiente.

Palavras-chave: Biomas; fase não parasitária; modelagem.

ABSTRACT

Rhipicephalus (Boophilus) microplus is an ectoparasite of great importance for animal health. Abiotic factors, such as temperature, interfere in several life stages of this parasite. This may reflect on the number of annual generations of this tick in different regions of Brazil. Its high prevalence, in addition to the transmission of pathogens such as *Babesia bovis*, *Babesia bigemina* and *Anaplasma marginale*, compromises the production of meat, milk and leather. As a result, Brazil loses ~ 3.2 billion dollars/year, compromising the local economy. Given this problem, predicting the population biology of the tick in its non-parasitic phase by computational modeling is a promising alternative to aid in parasite control. The objective of this study was to develop a model to predict the number of annual generations of *R. (B.) microplus* in Brazil. By searching for data on the biology of the non-parasitic phase of the tick, a bibliographic review was carried out in the PubMed, Scielo and Google Scholar databases. Subsequently, prediction equations by third-degree polynomial nonlinear regression models were performed, with temperature data as the predictor variable and the biological parameters pre-laying period and egg incubation as the response variables, considering $R^2 \geq 0.70$ and $p < 0.05$, significant. The model's prediction capacity was evaluated by comparing it with biology data from different studies in the literature. Subsequently, Brazil was divided into 136 quadrants of equal size (resolution $2.5^\circ \times 2.5^\circ$) by the geostatistical exponential method and the climate data (2020–2024) from a meteorological station in each quadrant accessed through the AGRITEMPO database served as input for the model to predict the number of annual generations of the tick. Statistical robustness was assessed using the root mean square error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE) and coefficient of determination (R^2). As a result, the mathematical prediction equations for the pre-laying period ($R^2 > 0.70$) and incubation ($R^2 > 0.80$) showed a negative correlation ($r < 0$) as a function of the climate variables and obtained RMSE = 2.67 and 11.80, respectively. Statistically, the model predictions differ from the real values by approximately 1.93 days (MAE) for the pre-laying period and 9.21 days (MAE) for egg incubation. Based on the prediction of the pre-laying and incubation period, associated with the larval maturation period and parasitic phase (22 days), the estimate of the number of annual generations for the regions of Brazil ranged from a minimum of 2.92 (South region) to a maximum of 6.18 generations (North region), showing the highest number of generations in equatorial regions, with higher temperatures. The Amazon biome had the highest number of generations among the biomes, with an average of 5.46 ± 0.29 annual generations. The model predictions differ from the actual values by approximately 0.378 generations (MAE), with $R^2 = 0.71$. These prediction results help in the development of new criteria for strategic tick control, such as changes in the management system, since knowledge of the parasite population dynamics in pasture are limiting factors for identifying tick peaks and, consequently, efficient parasite control.

Keywords: Biomes; non-parasitic phase; modeling.

SUMÁRIO

1.INTRODUÇÃO	12
2.REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.OBJETIVO(S)	25
3.1. Geral	26
3.2. Específicos	26
4.MATERIAIS E MÉTODOS	26
4.1. Bancos de dados: dados biológicos da fase não parasitaria de <i>R. (B.) microplus</i>	26
4.2. Banco de dados: temperatura	26
4.3. Definição de variáveis e desenvolvimento do modelo	27
4.4. Submodelo de regressão fase não parasitária	27
4.4.3. Validação empírica e análise estatística	28
4.5. Previsão do número de gerações de carrapatos nas regiões do Brasil	29
4.6. Validação da predição do número de gerações de carrapatos no Brasil	29
5.RESULTADOS	30
5.1. Submodelo fase não parasitária	30
5.2. Validação do modelo de previsão	34
5.3. Previsão do número de gerações de carrapatos nas regiões do Brasil	34
5.4. Validação da predição do número de gerações de carrapatos no Brasil	37
6.DISCUSSÃO	38
7.CONCLUSÃO	43
8.REFERÊNCIAS	44
9.ANEXOS	54

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

RMSE- Raiz do erro quadrático médio;

MAE - Erro Absoluto Médio;

R² - Coeficiente de determinação;

rs - Coeficiente de correlação Spearman;

SP – São Paulo;

MG – Minas Gerais;

SC – Santa Catarina;

MA – Maranhão;

DF – Distrito Federal;

PB – Paraíba;

PI – Piauí;

p - Valor de p;

ps- Valor de p para teste Shapiro-Wilk;

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da biologia de *R. (B.) microplus* na fase não parasitária em diferentes condições de temperatura. SP – São Paulo; MG – Minas Gerais; SC – Santa Catarina; MA – Maranhão; DF – Distrito Federal; PB – Paraíba; PI – Piauí.

Tabela 2 - Equações matemáticas de previsão a partir dos dados da biologia de *R. (B.) microplus*. R^2 = Coeficiente de determinação, p – valor p de significância para os testes estatísticos.

Tabela 3 - Número de gerações anuais do carrapato bovino nos biomas brasileiros.

Tabela 4 - Número de gerações anuais dos estudos e simulado pelo modelo de previsão. * - Calculados a partir dos dados dos estudos; Erro Ab.- Erro Absoluto.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do ciclo de vida do carrapato *Rhipicephalus(Boophilus) microplus*;

Figura 2 - Regressões não lineares entre temperatura (°C) e os parâmetros biológicos pré-postura (A) e incubação de ovos (B) de *R. (B.) microplus*. Y = Equação de previsão, R^2 = coeficiente de determinação;

Figura 3 - Período de pré-postura (A) e incubação de ovos (B) simulado pelo modelo de previsão (-----) e os encontrados nos estudos de Farias et al., 2018 (Lages, SC- SC); Sales et al., 2024 (São Luís, MA - MA); Santarém et al., 2003 (Botucatu, SP – SP1); Brovini et al., 2003 (Coronel Pacheco, MG - MG); Castro et al., 2021 (Parnaíba, PI - PI); Cruz et al., 2020 (Jaboticabal, SP - SP2), Barros et al., 2017 (Patos, Paraíba - PB); T (°C) – Temperatura. Mais informações sobre os dados em Tabela 1A.

Figura 4 - Predição do número de gerações anuais de *R.(B) microplus* no Brasil, contendo 136 quadrantes delimitados por 2,5° de resolução.

1. INTRODUÇÃO

Rhipicephalus (Boophilus) microplus, conhecido popularmente como carrapato bovino, é o ectoparasito hematófago mais importante na transmissão de agentes patogênicos para bovinos em todo o mundo (Marques et al., 2020). Este carrapato, é vetor biológico de bactérias como *Anaplasma marginale* e protozoários como *Babesia bovis* e *Babesia bigemina*, principais agentes etiológicos de patologias da tristeza parasitária bovina que causam a emaciação e a morte prematura de animais, afetando diretamente na produção pecuarista (Dias Filho et al., 2007).

As perdas econômicas no Brasil por causa desse ectoparasito chegam ~ 3,2 bilhões de dólares por ano, portanto causa enorme prejuízo para a economia nacional (Dolenga et al., 2022; Marques et al., 2020, Grisi et al 2014). Atualmente, o controle *R. (B.) microplus* é realizado por meio de carrapaticidas sintéticos amplamente comercializados. Entretanto, esses compostos são usados de modo indiscriminado levando a seleção de indivíduos resistentes para a maioria das classes químicas disponíveis (Reck et al., 2014; Klafke et al., 2017; Valsoni et al., 2021; Valsoni et al., 2020).

Em resumo, o ciclo de vida *R. (B.) microplus* apresenta duas fases: não parasitária (que acontece no ambiente), e a parasitária (sobre o animal). A fase não-parasitária, se inicia com o desprendimento da teleógina do hospedeiro e queda ao solo para postura dos ovos e, posterior eclosão das larvas. Enquanto a fase parasitária, inicia quando as larvas se fixam no hospedeiro, desenvolvendo até a fase de teleógina para posterior queda, assim reiniciando o ciclo (Verissimo et al., 2013).

Durante a fase não parasitária os fatores abióticos atuam como modeladores do ciclo de vida de *R. (B.) microplus*. Durante o período quente e chuvoso os períodos do ciclo de vida de fêmeas de *R. (B.) microplus* são curtos e a taxa e eclosão de larvas tende ser de ~80 a 100%. Contudo, temperaturas > 32 °C e excesso de chuvas pode ser letal ovos e larvas de *R. (B.) microplus* (Pereira Campos et al. 2008, Sales et al., 2024). Mesmo sob chuvas e elevada umidade relativa (~90%), as baixas temperaturas (<20°C) causa um retardamento nos períodos biológicos das fêmeas e prolonga a sobrevivência de larvas. Entretanto, invernos rigorosos e períodos longo de seca pode ser deletério para ovos e larvas (Campos Pereira et al. 2008). No geral, as melhores condições abióticas para *R. (B.) microplus* é aquela com temperatura média de 27°C e umidade relativa ~ 90% (Pereira Campos et al. 2008; Verissimo et al., 2013).

Nesse contexto, o estabelecimento de *R. (B.) microplus* em determinadas regiões está associado com as condições abióticas locais, como por exemplo temperatura, precipitação e umidade relativa do ar (Chevillon et al., 2013; Cruz et al., 2020; Sungirai et al., 2018). Enquanto a umidade relativa e precipitação atuam na viabilidade dos ovos e na sobrevivência de larvas, a temperatura possui grande influência nas taxas de desenvolvimento do parasito, especialmente durante sua fase não parasitária, que é encurtada sob altas temperaturas ou prolongada sob baixas temperaturas (Sales et al., 2024), impactando diretamente o número de gerações anuais dos carrapatos.

No Brasil, o número de gerações anuais de *R. (B.) microplus* varia de três a cinco, dependendo da região e do clima (EVANS, 1992). Por exemplo, na região Sudeste, o número de gerações anuais de carrapatos aumentou de três para cinco (Evans, 1992, Cruz et al., 2017; Nicaretta et al., 2021; Cruz et al., 2020; Gomes et al., 2016). Nas regiões Sul e Centro-Oeste (Mata atlântica e Cerrado), foram estimadas três e quatro gerações anuais, respectivamente (Carneiro et al., 1992; Fonseca et al., 1999; Lima et al., 2000; Furlong et al., 2003; Marvullo, 2014, Kasai et al., 2000). Na região Nordeste (Caatinga, Amazônia), estudos estimaram eventuais três e seis gerações anuais, condicionadas principalmente com a extensão de chuvas no período seco e temperaturas e umidades altas ao longo do ano (Barros et al., 2017; Sales et al., 2024).

Assim, as análises de adequação do habitat do carrapato bovino devem considerar, além de fatores bióticos (hospedeiros), as variáveis climáticas (Nava et al., 2022). Nesse sentido, estudos de modelagem computacional de previsão, por sensoriamento remoto com base em imagens de satélite AVHRR (radiômetro avançado de alta resolução) e métodos geoestatísticos padrão (cokrigagem), já utilizam variáveis preditoras (temperatura e índice de vegetação) associada a registros de distribuição do carrapato para estimar a distribuição de aptidão de habitat (HS) do carrapato *R. (B.) microplus* nas Américas Central e do Sul (Estrada-Peña et al., 1999; Estrada-Peña et al., 2001; Estrada-Peña et al., 2006).

Apesar dos avanços na estimativa da distribuição do carrapato bovino, ainda faltam estudos de modelagem preditiva que integrem variáveis climáticas, dados de distribuição de *R. (B.) microplus* e informações sobre sua biologia em todo o Brasil. Essa lacuna é especialmente evidente nos biomas Amazônia e Caatinga. Considerando as mudanças graduais no clima global e as alterações nos ecossistemas, torna-se essencial aprofundar o entendimento da ecologia e dinâmica populacional desse ectoparasita, visando o

desenvolvimento de estratégias de controle mais eficazes, visto que conhecer o número de gerações anuais ajuda a prever quando a população de carrapatos estará em seu auge, o que permite planejar melhor o uso de tratamentos antiparasitários, evitando picos populacionais (Estrada-Peña et al. 2022, Calvano et al., 2021).

Diante do exposto, este estudo, visou desenvolver um modelo de previsão do número de gerações de *R. (B.) microplus* no Brasil, a partir das condições climáticas nas suas diferentes regiões e da fase não parasitária de *R. (B.) microplus*.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*

Originário da Ásia, especialmente da Índia e da Ilha de Java, o *Rhipicephalus (B.) microplus*, disseminou-se em decorrência das expedições exploratórias que envolviam a significativa movimentação de animais e mercadorias ao longo da História. Consequentemente, observou-se a rápida expansão do carrapato e sua introdução em regiões tropicais e subtropicais ao redor do mundo, incluindo Austrália, México, América Central, América do Sul e África. Este processo de disseminação, situou-se predominantemente nas áreas delimitadas pelos paralelos 32° Norte e 32° Sul (Gonzales et al., 1995).

No Brasil, sua introdução ocorreu através de bovinos comprados no Chile, no início do século XVIII, com destino ao estado do Rio Grande do Sul. Atualmente, encontra-se disseminado por quase todo o país e a sua incidência varia de acordo com as condições climáticas e os tipos raciais de bovinos (Miraballes et al 2018, Cruz et al., 2020).

Taxonomicamente, o carrapato bovino se enquadra no filo Artropoda, classe Aracnida, ordem Acarina, subordem Metastigmata e superfamília Ixodidea, pertencendo ao gênero *Rhipicephalus* e ao subgênero *Boophilus*. Inicialmente, foi denominado de *Boophilus microplus*, entretanto, estudos e análises filogenéticas posteriores resultaram na reclassificação dos carrapatos do gênero *Boophilus* como pertencentes ao gênero *Rhipicephalus*, passando a ser denominados como *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (Murrell; Barker, 2003).

Este ectoparasito é monóxico, ou seja, realiza seu ciclo de vida em um único hospedeiro. Os bovinos são os principais hospedeiros de *R. (B.) microplus*. No entanto, este carrapato também pode parasitar outros animais, incluindo equinos, ovinos e até cervídeos

que compartilham o mesmo ambiente que os bovinos. As raças de bovinos, como taurinas (*Bos taurus*), zebuínas (*Bos indicus*) e seus cruzamentos, são as mais afetadas por essa espécie de carrapato (Calvano et al., 2021).

2.2. Ciclo biológico

O ciclo de vida desse ectoparasito envolve duas fases: 1) a fase parasitária, que abrange desde a fixação da larva no hospedeiro até atingir o estágio adulto, culminando no desprendimento das teleóginas (fêmeas ingurgitadas); e 2) a fase não parasitária, que se inicia com o desprendimento da teleógina do hospedeiro, sua queda ao solo para oviposição (postura dos ovos), seguida pela incubação dos ovos e, por fim, a eclosão das larvas, como representado na Figura 1 (Mastropaolo et al., 2017).

A fase não parasitária de *R. (B.) microplus* é o período em que o carrapato permanece no ambiente para efetuar, além da postura e incubação dos ovos, a eclosão e maturação das larvas. Em média, três dias após a queda no solo, a fêmea ingurgitada inicia a postura, que dura em torno de 15 dias, em condições controladas de laboratório (27°C e UR 80%). Entretanto no ambiente, devido a variação de temperatura e umidade, pode-se estender por maiores períodos, principalmente em épocas de baixa temperatura (Jain et al., 2020).

Associado a isso, a temperatura pode afetar na distância que a fêmea ingurgitada percorre ao cair ao solo para a oviposição, apresentando um maior deslocamento durante o período de inverno do que no verão, devido ao carrapato demorar mais na busca do local com condições de temperatura e umidade ideais para postura dos ovos. Em consequência, há o atraso no ciclo do parasitário e aumenta as chances de atividades predatórias sobre as fêmeas (Verissimo et al., 2013).

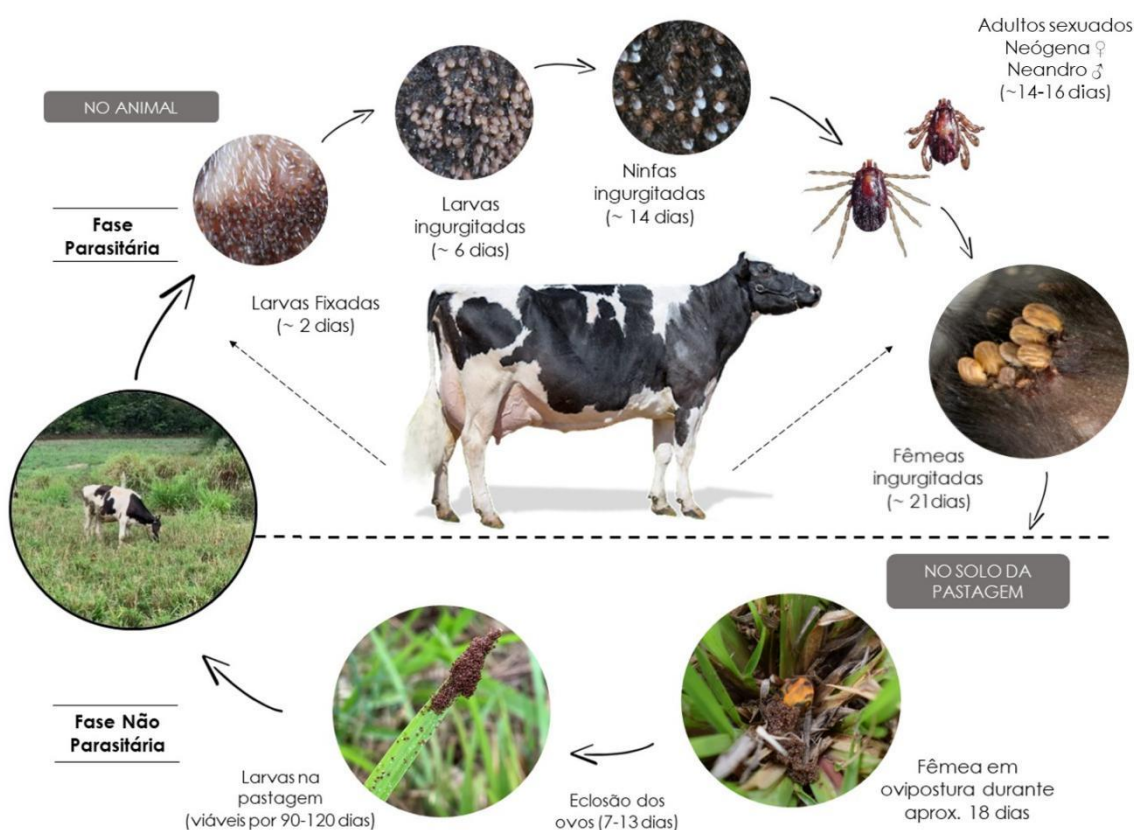


Figura 1. Esquema do ciclo de vida do carrapato *Rhipicephalus(Boophilus) microplus*. Ilustração de Isabela Chaves (2022).

No período de postura, o peso total da massa de ovos equivale a cerca de 50% do peso da fêmea ingurgitada antes do início da postura, em um total de 2000 a 3000 ovos. Entretanto, somente 1,5 % desta população de carrapato consegue chegar a fase adulta, devido a atividade predatória de fungos, bactérias, aves e insetos, bem a como influência de patógenos, além dos carrapatos que morrem por não encontrarem o hospedeiro (Pereira et al., 2008).

Além disso, o período de incubação também manifesta variações contingentes às condições climáticas, sendo que fatores como temperaturas mais baixas podem propiciar uma extensão desse intervalo temporal. Concluída a etapa de incubação dos ovos, ocorre a eclosão das larvas. Inicialmente, com coloração praticamente translúcida, apresentam modificações ao entrar em contato com o oxigênio atmosférico, assumindo uma tonalidade avermelhada devido a alterações na quitina cuticular (Pereira et al., 2008).

Subsequentemente, as larvas ingressam em um breve estado de quiescência antes de ascenderem agrupadas em direção às extremidades foliares por meio de um tropismo negativo ao geotropismo. Nestas localizações, aguardam de forma coletiva a passagem do

hospedeiro, sendo orientadas por estímulos como odor, vibrações, sombreamento, estímulo visual e concentração de dióxido de carbono emitido pelo hospedeiro (Tabor et al., 2017).

Após as larvas infestantes se ancorarem no hospedeiro bovino, começam a se alimentar ao ingerir linfa. Aproximadamente no oitavo dia após a fixação, ocorre a primeira muda, resultando na transformação das larvas em ninfas. A partir desse estágio, inicia-se o processo de diferenciação sexual (Garcia et al., 2019).

Cerca de 15 dias após fixarem-se no hospedeiro, os machos alcançam a maturidade adulta, alimentando-se de sangue e fertilizando várias fêmeas. Quando a fêmea atinge a maturidade sexual, é fecundada e continua a se alimentar de sangue até atingir completa ingurgitação. Nesse estágio, ela é denominada teleógina e, por volta do 21º dia, se desvincula do hospedeiro, caindo ao solo para iniciar o processo de postura de ovos, reiniciando assim o ciclo de vida (Andreotti et al., 2019).

2.3. Fatores abióticos que regulam o ciclo biológico dos carrapatos

Vários são os fatores abióticos que regulam o ciclo biológico dos carrapatos, dentre estes, a temperatura e umidade se destacam como predominantes, influenciando diretamente na oviposição e eclosão de larvas (Cruz et al., 2020).

Os carrapatos são mais ativos durante as estações mais quente do ano, como no verão, desde que as chuvas sejam suficientes, proporcionando umidade necessária para o desenvolvimento embrionário e a viabilidade das larvas de *R. (B.) microplus*. Períodos secos, com baixos índices de umidade relativa do ar, influenciam diretamente na eclosão larval, levando os ovos ao estado de hipobiose, retardando seu desenvolvimento e eclosão na espera de um limiar de umidade necessário para o seu desenvolvimento (Pfäffle et al., 2013).

Diferentemente das larvas ou dos adultos, os ovos não absorvem água mesmo quando submetidos a umidade relativa de 95%. Ovos expostos à luz solar direta ou a altas temperaturas e umidades dos dias nublados apresentam baixa de fertilidade e ressecando quando expostos a baixos índices de umidade relativa (Hitchcock, 1955).

Segundo Copeman (1978), o número de carrapatos de uma região é diretamente proporcional com a umidade do ar, tipo e manejo da pastagem (oferecendo abrigo adequado aos estágios não parasitários) e temperatura (fazendo com que o período de incubação atinja

valores mínimos). Hitchcock (1995) relata também que ovos mantidos em temperaturas superiores a 21° C e com alta umidade relativa favoreceram a eclosão. Entretanto, em temperaturas abaixo de 15° C, estes são incapazes de eclodir.

Especificamente na região do cerrado brasileiro, onde a umidade do ar é muito baixa durante a segunda metade do ano, a época seca exerce uma grande influência negativa no desenvolvimento de ovos e larvas na pastagem durante a fase não parasitária, o que diminui a infestação de carrapatos nesse período (Furlong, 2003). Associado a isso, o ambiente na estação da seca no período final do inverno exerce um efeito deletério sobre os ovos e larvas com redução da longevidade e retardando a emergência das larvas, pois apresenta por apresentar baixas umidades relativas e cobertura vegetal reduzida, os ovos e larvas sofrem dessecação. Em contrapartida, com o início da chuva na primavera e elevação da temperatura, as condições se tornam mais favoráveis para desenvolvimento, e as fêmeas encontram mais rapidamente um ambiente úmido favorável para postura dos ovos, propicia o aceleração no ciclo de vida do carrapato (Gomes et al., 2016).

Caracterizado por seis biomas, Caatinga, Cerrado, Mata Atlântica, Pampas, Pantanal e Floresta Amazônica, o Brasil é acometido por desafios devido as rápidas mudanças ambientais resultantes da perda de habitat em cada um desses biomas. Esses ecossistemas estão sob diversas pressões causadas por atividades humanas como agricultura intensiva e urbanização, e principalmente expansão da pecuária intensiva de carne bovina nas regiões do Brasil (Da Fontoura et al., 2024; Vasconcellos; Caiado Couto, 2021; Vale et al., 2019).

2.4. Modelos computacionais

2.4.1. Cronologia de modelos de *Rhipicephalus* spp.

Em 1973, pesquisadores da Organização de Pesquisa Científica e Industrial da Commonwealth (CSIRO) da Austrália introduziram o primeiro modelo explicitamente representativo dos carrapatos *Rhipicephalus*, desenvolvendo um modelo analítico que previa a mortalidade de *Rhipicephalus australis* no hospedeiro (Sutherst et al., 1973). Em 1974, apresentaram o modelo de simulação TICK1, com um intervalo de tempo semanal (Sutherst; Dallwitz, 1979).

Em 1978, desenvolveram um modelo analítico denominado PICKUP, projetado para prever larvas em busca de hospedeiros (Sutherst et al., 1978). Expandiram seu modelo de

mortalidade no hospedeiro adicionando variáveis determinantes (Sutherst et al. 1979) e iniciaram o desenvolvimento do TICK2, um modelo de simulação mais detalhado com intervalo de tempo diário (Maywald et al., 1980).

No final da década de 1970, os pesquisadores também conceberam um modelo de matriz de Leslie para a dinâmica populacional de *R. australis* (MATIX), destinado a simular estratégias integradas de manejo de carrapatos (Sutherst et al., 1979a). Isso incluía estratégias específicas para bovinos mestiços (Sutherst et al., 1980). Além disso, combinaram o MATIX com modelos de genética populacional para avaliar o desenvolvimento de resistência a acaricidas (Sutherst; Comins, 1979) e com modelos de análise de decisão (Elder et al., 1983; Norton et al., 1983, 1984; Elder; Morris, 1986) para prever os efeitos de estratégias de gestão.

Ao longo desse período, os pesquisadores também desenvolveram um modelo (LARVS) para prever a mortalidade larval fora do hospedeiro (Utech et al., 1983), que posteriormente foi combinado com o modelo de mortalidade sobre o hospedeiro (Bourne et al., 1988). Introduziram ainda um modelo de competição interespecífica (STERHB) entre *Rhipicephalus microplus* e *Rhipicephalus decoloratus*, representando o primeiro modelo de *Rhipicephalus* aplicado à África (Sutherst et al., 1987). Em 1987, o modelo TICK2, o primeiro modelo de simulação de ecologia de carrapatos com intervalo de tempo diário, tornou-se operacional e representava individualmente cada bovino hospedeiro (Dallwitz, 1987a, b, c).

Em 1985, foi introduzido o CLIMEX, um modelo bioclimático que antecipava um índice ecoclimático para a população de uma espécie em um local específico com base em índices de crescimento potencial e estresse (Sutherst; Maywald, 1985). O CLIMEX foi empregado para prever as distribuições de *R. australis* no sul da Austrália e *R. (B.) microplus* no sul da África (Sutherst, 1987b). Além disso, foi utilizado para analisar os efeitos das mudanças climáticas na distribuição de carrapatos (Maywald; Sutherst, 1989) e, quando integrado a um sistema especializado, auxiliou consultores agrícolas na recomendação de estratégias de controle de carrapatos (Sutherst; Bottomley, 1989).

Cerca de uma década após o surgimento dos modelos *Rhipicephalus* na Austrália, esses modelos começaram a ser utilizados nas Américas. Pesquisadores do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, Serviço de Pesquisa Agrícola (USDA-ARS), em 1982, anteciparam os efeitos da liberação de larvas híbridas estéreis (*Rhipicephalus annulatus* x *R.*

(*B. microplus*) como uma estratégia de erradicação (Osburn; Knippling, 1982). Posteriormente, incorporaram grande parte desse modelo a um sistema mais complexo, que explicitamente representava cada fase do ciclo de vida (Weidhaas et al., 1983).

Associado a isso, pesquisadores do Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (CIGB) em Cuba utilizaram o modelo de Weidhaas et al. (1983) para prever os impactos da vacinação, com e sem o uso de acaricidas, nas populações de *R. microplus* em Cuba (Rodríguez 1995, Labarta et al. 1996). Posteriormente, eles adaptaram o modelo base para o BCTSIM, criando uma nova versão chamada TICKSIM, ao modificar o submodelo de vacina (Lodos et al. 1995, 2000) e acrescentar um submodelo de liberação híbrida estéril (Lodos et al. 1999). Mais adiante, pesquisadores brasileiros ajustaram o BCTSIM para simular as populações de *R. microplus* em Minas Gerais (Fonseca et al. 2000, Delgado 2002). Smith et al. (2000) empregaram seu modelo de planilha para examinar os efeitos das estratégias de controle de carrapatos na estabilidade enzoótica da babesiose no Brasil e no Paraguai.

No período de 1985 a 1993, pesquisadores do Centro Nacional de Saúde Animal e Vegetal de Cuba (CENSA) e da Universidade de Havana (UH) publicaram artigos sobre a modelagem de *R. (B.) microplus* em Cuba. Inicialmente, construíram modelos analíticos de pré-postura e incubação em graus-dia (De La Veja, D.1985a, b, c, 1986), utilizando-os para prever os efeitos dos piquetes de quarentena (De La Vega et al., 1988, De La Veja, D. 1992). Subsequentemente, desenvolveram um modelo de graus-dia para a longevidade larval (De La Veja, D. 1987) e o integraram ao modelo anterior para prever a duração completa da fase fora do hospedeiro (De La Vega et al., 1993).

Durante o mesmo período, pesquisadores da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) anteciparam a distribuição de *R. (B.) microplus* em várias localidades no Brasil utilizando apenas o CLIMEX (Saueressig; Honer, 1993) ou combinando-o com um modelo de graus-dia (Honer; Gomes, 1990, Saueressig; Honer, 1995) ou um modelo de dinâmica populacional (Honer et al., 1993, Arantes et al., 1995). Nos Estados Unidos, Popham e Garris (1991) desenvolveram um modelo estocástico de matriz de transição estruturada em estágios para *R. (B.) microplus*, visando avaliar estratégias de erradicação em Porto Rico, enquanto Strey et al (1991) elaboraram um modelo analítico para a incubação de ovos de *R. annulatus*. Pesquisadores do USDA-ARS criaram o BCTSIM, que simulava todo o ciclo de vida de *R. (B.) microplus* ou *R. annulatus* (Mount et al., 1991) e posteriormente o modificaram para representar a transmissão de *Babesia spp.* por qualquer

espécie de carrapato (Haile et al., 1992).

A tabela abaixo mostra um parâmetro geral da cronologia dos modelos computacionais.

Tabela. Cronologia dos modelos computacionais.

Nome do modelo	Ano	Aplicação	Referência
-	1973	Modelo analítico que prever a mortalidade de <i>Rhipicephalus australis</i> no hospedeiro.	Sutherst et al. (1973)
TICK1	1974	Modelo mortalidade de <i>Rhipicephalus australis</i> no hospedeiro com intervalo semanal.	Sutherst et al. (1979)
PICKUP	1978	Modelo para prever larvas em busca de hospedeiros.	Sutherst et al. (1978)
TICK2	1980	Modelo mortalidade de <i>Rhipicephalus</i> no hospedeiro com intervalo diário.	Maywald et al. (1980)
MATIX	1980	Simulação de estratégias integradas de manejo de carrapatos	Sutherst et al. (1980)
LARVS	1983	Previsão da mortalidade larval fora do hospedeiro	Utech et al. (1983)
CLIMEX	1985	Modelo bioclimático utilizado para prever a distribuição de espécies em resposta a variáveis climáticas.	Sutherst; Maywald (1985)
STERHB	1987	Modelo de competição interespecífica entre <i>Rhipicephalus microplus</i> e <i>Rhipicephalus decoloratus</i> ,	Sutherst et al. (1987)
BCTSIM	1991	Modelar a dinâmica populacional do carrapato <i>R.(B) microplus</i> , levando em consideração tanto	Mount et al. (1991)

		fatores ambientais (clima, temperatura, umidade) quanto parâmetros biológicos (ciclo de vida do carrapato, sobrevivência, reprodução).	
TICKSIM	1995	Modelo dinâmico usado para prever a população do carrapato ao longo do tempo, com foco em simulações que consideram o efeito de controle químico e biológico.	Lodos et al. (1995)
MaxEnt	2006	Programa para modelar distribuições de espécies a partir de registros de espécies somente por presença	Phillips et al. (2006)

2.4.2. Modelos de distribuição geográfica de *R. (B.) microplus*

A ecologia de *R. (B.) microplus* desempenha um papel crucial na formulação de programas de erradicação do carrapato (Leal et al., 2024; Nicaretta et al., 2021). O clima é o principal fator que influencia a distribuição geográfica de uma espécie de carrapato. É essencial definir a distribuição geográfica e a adequação relativa dos diferentes ambientes para *Rhipicephalus spp.*, assim como as flutuações anuais na abundância de carrapatos, antes de decidir sobre o uso de métodos carrapaticidas. O desafio do controle é ampliado pela falta de conhecimento da bioecologia do carrapato e pela ausência de métodos para quantificar as preferências de habitat (Estrada-Peña et al., 2006).

Através da modelagem computacional utilizando dados derivados de satélites meteorológicos, os primeiros estudos de mapeação de adequação de habitats de *R. (B.) microplus* foram relatados. Por imagens de média resolução, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), calculado a partir dos dados do radiômetro avançado de muito alta resolução (AVHRR) dos satélites meteorológicos da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) que quantifica o nível de atividade fotossintética da vegetação (Estrada-Peña, 1999) foram definidos e entrada de dados de habitat.

Nesse cenário de modelagem, a temperatura e a vegetação foram empregadas como os principais fatores para definir as características do habitat dos carrapatos. A vegetação foi inferida pelo uso de NDVI, calculado com base nas bandas de comprimento de onda do vermelho e do infravermelho próximo, e relacionado à radiação fotossinteticamente ativa. Sabe-se que esse índice está correlacionado com a umidade relativa e a precipitação. Portanto, embora seja desafiador calcular a umidade relativa por meio de sensoriamento remoto, o NDVI fornece uma maneira conveniente de estimá-la.

Uma característica comum dos dados de distribuição é a autocorrelação espacial, onde áreas amostrais próximas tendem a ser mais semelhantes entre si do que áreas distantes. A geoestatística se concentra na detecção, modelagem e estimativa desses padrões espaciais (Estrada Peña, 1998). A krigagem é uma técnica geoestatística comum, fornecendo um método para interpolar valores em locais desconhecidos e calcular uma medida da variância desses valores estimados.

As variáveis de temperatura máxima absoluta e média das temperaturas máximas mensais e NDVI, demonstraram ser capazes de mapear a adequação do habitat (SH) de *R. (B). microplus* em sua área de distribuição em grande parte da América do Sul, Central e parte do México (Estrada Peña, 1998, 2001, 2005, 2006).

2.4.3. Modelos de dinâmica populacional de carrapatos

Geralmente os modelos de dinâmica populacional de carrapatos empregam a temperatura como fator principal para influenciar nas taxas de desenvolvimento, frequentemente representam o desenvolvimento como graus-dia acima de um limiar mínimo (Sutherst; Dallwitz 1979, De La Vega, D., 1985a, Dallwitz, 1987a, Mount et al., 1991, Strey et al., 1991). Outros modelos já abordam taxas de desenvolvimento com base em dados de campo (Sutherst et al. 1979b, Popham; Garris 1991) ou como períodos de desenvolvimento fixados por estação (Teel et al., 1996, Hernández-Arrieta et al., 2000) ou independentes da estação (Weidhaas et al., 1983).

Em contraste, Popham e Garris (1991) utilizaram funções de densidade de probabilidade fixas para simular o desenvolvimento de um estágio do carrapato para o seguinte. Os modelos de dinâmica populacional abordaram as taxas de mortalidade de maneiras semelhantes. Todos aqueles que incorporaram a umidade ambiente o fizeram explicitamente para impactar as taxas de mortalidade.

O BoopMod (Corson et al., 2004), por exemplo, calculou as taxas de mortalidade larval como a soma do déficit diário de saturação acima de um limite. Uma abordagem singular foi desenvolvida por Sutherst e Dallwitz (1979), que usaram precipitação e evaporação para calcular um Índice de Secura do Solo influenciando a mortalidade dos ovos, incluindo também a influência do estresse pelo frio na mortalidade dos ovos.

Alguns modelos utilizaram apenas a temperatura para prever as taxas de mortalidade, como no caso das larvas de la Vega e Diaz (1987). Outros modelos de simulação empregaram tanto a temperatura quanto a umidade ambiente para influenciar a mortalidade. O BCTSIM (Mount et al., 1991), por exemplo, estabeleceu taxas de mortalidade fora do hospedeiro para condições ideais, modificando-as com índices de temperatura, déficit de saturação e precipitação. Nas funções de densidade de probabilidade de Popham e Garris (1991), todos os estágios externos morreram em temperaturas acima de 30°C ou umidades relativas abaixo de 30%, limites mais baixos do que os utilizados em outros modelos.

À semelhança das taxas de desenvolvimento, alguns modelos fixaram as taxas de mortalidade por estágio do parasito ou estação do ano. Weidhaas et al. (1983) estabeleceram taxas de mortalidade semanais independentemente da estação, enquanto Osburn e Knipling (1982) fizeram o mesmo para a mortalidade larval. Sutherst et al. (1979b) variaram as taxas de mortalidade de ovos e larvas por estação do ano.

O TICK2, ao contrário dos demais modelos, considerou a maior sensibilidade dos ovos jovens à dessecação, reduzindo um multiplicador de estresse à medida que os ovos envelhecem (Maywald 1987). As taxas de mortalidade influenciaram a duração das fases da vida, incluindo a longevidade larval, crucial para os carrapatos. De la Vega e Diaz (1987) estimaram a última morte larval de uma coorte em 703 graus-dia. Utech et al. (1983) calcularam o estresse acumulado nas larvas com base na temperatura máxima diária, embora o déficit de saturação às 15h00 fosse igualmente eficaz. Tentativas de aprimorar as previsões da longevidade larval, incluindo umidade do solo, temperatura mínima ou precipitação, não obtiveram sucesso.

As taxas de mortalidade de carrapatos no hospedeiro permaneceram fixas em alguns modelos durante uma simulação (Weidhaas et al., 1983, Teel et al., 1996), enquanto outros dependiam do tipo de gado e da densidade de carrapatos no hospedeiro (Sutherst et al. 1973, Mount et al., 1991) e estação do ano (Sutherst et al. 1979a).

Nesse mesmo intuito de aprimorar os modelos computacionais, já foram utilizados

modelos de carrapatos de outras espécies como base para investigar: a eficácia de novas estratégias no controle de carrapatos, como a utilização de carrapaticidas em animais específicos (Wang et al., 2012), os impactos das variações sazonais nas densidades e abundâncias de hospedeiros nos estágios de vida dos carrapatos, influenciando a dinâmica dos patógenos transmitidos por carrapatos (Wang et al. 2015), os efeitos das alterações na diversidade de hospedeiros e na composição da comunidade sobre o risco de doenças (Logiudice et al., 2003).

Fica nítido que modelos de previsão para *R. microplus* permitem formular hipóteses específicas de causa e efeito, principalmente na sua fase não parasitária, esta influenciada principalmente por condições climáticas, refletindo no número de gerações anuais do carrapato bovino nas diferentes regiões. Além disso, a modelagem computacional permite extrapolar resultados para regiões pouco estudadas, como regiões da Amazônia e da Caatinga brasileira, utilizando ferramentas climatológicas e dados biológicos do carrapato pré-existent.

3. OBJETIVO(S)

3.1. Geral

Desenvolver um modelo de previsão do número de gerações anuais de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* nas diferentes regiões do Brasil.

3.2. Específicos

- I. Elaborar um modelo matemático de previsão do período de pré-postura de *R. (B.) microplus*.
- II. Elaborar um modelo matemático de previsão do período de incubação dos ovos de *R. (B.) microplus*;
- III. Predizer o número de gerações anuais do carrapato bovino em todo o Brasil.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Bancos de dados: dados biológicos da fase não parasitária de fêmeas de *R. (B.) microplus*.

Por meio da revisão de literatura e fornecimento de dados de pesquisadores colaboradores, foi desenvolvido um banco de dados da biologia da fase não parasitária do carrapato *R. (B.) microplus* no Brasil, em diferentes condições de temperatura. A compilação de dados de publicações técnicas e científicas foi realizada utilizando ferramentas de busca e de bases de dados, como PubMed, Scielo e Google Scholar, disponíveis na internet. O software Juicr (v.0.1, University of South Florida, 2021) foi utilizado para extração de dados a partir de imagens dos artigos presente na literatura.

O período de compilação de dados foi de julho de 2022 até maio de 2024, utilizando diversas combinações de termos relacionados a: “períodos de pré-postura”, “postura”, “incubação de ovos”, “biologia da fase não parasitária de *R. (B.) microplus*” e “número de gerações *R. (B.) microplus* no Brasil”. Estas variáveis foram correlacionadas com temperatura local do estudo, restritamente no Brasil.

Os dados foram organizados através da ferramenta Microsoft Excel 2007 com o pacote complementar @Risk (versão 7.5, Palisa de Corporation, Nova York, EUA) para posterior análise e interpretação.

4.2. Banco de dados: temperatura

O Brasil foi dividido em 136 quadrantes utilizando a resolução 2,5° x 2,5°, interpoladas pelo método exponencial geoestatístico de Kriging, segundo a metodologia de Matheron (1973) e Krige (1951), com as mesmas especificações do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) (Assis et al., 2019). Em alguns quadrantes de bordas foi necessário o recorte de grade manual para cobrir todas as regiões do Brasil.

O banco de dados do Sistema de Monitoramento Agrometeorológico (AGRITEMPO) disponível: <https://www.agritempo.gov.br/agritempo/index.jsp> foi utilizado como fonte de dados climáticos (Bambini et., 2014) para obter dados de temperatura de uma estação meteorológica representativa de cada quadrante do período de 15/04/2020 a 15/04/2024, totalizando 48 meses. Entretanto, para 20 quadrantes não foi possível obter dados

de todos os meses, sendo utilizado no mínimo 24 meses para busca dos dados.

4.3. Definição de variáveis e desenvolvimento do modelo

Para desenvolver o modelo de previsão do número de gerações, a partir dos dados coletados, foram feitas análises estatísticas entre as variáveis, a fim de modelar suas relações, sendo utilizadas regressão polinomial de terceiro grau entre os parâmetros biológicos da fase não parasitária do ciclo de *R. (B.) microplus* e os dados de temperatura.

Os componentes majoritários do modelo foram definidos: (a) Temperatura, esta variável preditora; (b) Período de pré-postura (tempo desde a queda da fêmea no solo até o início a oviposição); (c) Período de Incubação (tempo desde o primeiro ovo até eclosão da primeira larva) e (d) Período de maturação das larvas (tempo entre a eclosão da primeira larva até o surgimento da primeira larva na ponta do capim) (Sales et al., 2024; Cruz et al., 2020; Miotti et al., 2024), estas variáveis respostas.

Cada parâmetro representa um momento específico na vida do carrapato e os fluxos de cada parâmetro biológico para as próximas representam as etapas sequenciais essenciais do desenvolvimento do parasito na sua fase não parasitária. Conceitualmente, o modelo contém submodelos que representam (1) parâmetros biológicos do ciclo de vida de *R.(B). microplus* na fase não parasitária e (2) número de gerações de carrapatos, sendo a aplicação do modelo de regressão. O modelo conceitual biológico no qual o modelo matemático foi baseado está representado na Figura 1A.

4.4. Submodelo de regressão fase não parasitária

4.4.1. Conjunto de treinamento (*trainingset*) e conjunto de teste (*testset*)

Os dados da biologia de *R. (B.) microplus* foram divididos em dois grupos: conjunto de treinamento (*trainingset*), que consiste em um subgrupo de dados a partir do qual o modelo foi ajustado para se adequar aos padrões observados, enquanto um conjunto de testes (*testset*) foi usado para verificar a precisão do modelo (Estrada-Peña., 2006).

A proporção de dados utilizadas para *trainingset* e *testset* foram dependentes do espaço amostral, de acordo com a metodologia de Vrigazova et al. (2021).

4.4.2. Pré-postura e incubação de ovos

Relações entre o período de pré-postura e incubação de ovos (dias) com a temperatura foram realizadas por meio de regressões polinomiais de grau 3, de acordo com a metodologia adaptada de Mount, (1991). Para integrar a análise de dados, os períodos de oviposição foram inclusos nos períodos de incubação de ovos. Coeficientes de determinação (R^2) $\geq 0,70$ e p-valor $< 0,05$ foram considerados significativos para prosseguimento do estudo. As equações matemáticas do modelo foram dadas pela seguinte função genérica:

$F(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$. Onde $F(x)$ são os períodos de pré-postura e incubação dos ovos de *R.(B.) microplus* (variáveis respostas) em função da variável climática (X), preditora.

4.4.3. Validação empírica e análise estatística

A capacidade do modelo de prever os períodos dos parâmetros biológicos pré-postura e incubação de ovos da fase não parasitária do ciclo de vida de *R. (B.) microplus* foi avaliada a partir da comparação dos dados simulados pelas equações e os dados de estudos da biologia do carrapato obtidos, conforme descrito no item 4.1 (conjunto de teste).

Para validar a equação matemática de previsão do período de pré-postura (dias) foram utilizados os dados do estudo de Farias et al., (2018) em Lages, Santa Catarina; Sales et al., (2024) em São Luís, Maranhão e Santarém et al., (2003) em Botucatu, São Paulo.

Para equação matemática de previsão do período de incubação de ovos (dias) foram utilizados os dados do estudo de Farias et al., (2018) em Lages, Santa Catarina; Sales et al., 2024 em São Luís, Maranhão; Brovini et al., (2003) em Coronel Pacheco, Minas Gerais; Santarém et al., (2003) em Botucatu, São Paulo; Castro et al., (2021) em Parnaíba, Piauí; Cruz et al., (2020) em Jaboticabal, São Paulo e Barros et al., (2017) em Patos, Paraíba.

As análises estatísticas entre os parâmetros biológicos da fase não parasitária de *R. (B.) microplus* e os dados de temperatura foram realizadas pelo teste de Shapiro-Wilk para normalidade e testes não paramétricos de Spearman para avaliar a relação monotônica entre os dados da biologia pareados com a temperatura (Jain et al., 2015). A robustez estatística do modelo de previsão foi avaliada por meio de medidas de ajuste: raiz do erro quadrático médio (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e coeficiente de determinação (R^2), segundo a metodologia adaptada de Miotti et al., 2024.

As análises estatísticas foram realizadas com GraphPad Prisma e Anaconda versão 2.6.1 com extensão do Jupyter versão 7.0.8 (Jain et al., 1997; Horton et al., 2015).

4.5. Previsão do número de gerações de carrapatos nas regiões do Brasil

Os dados médios de temperatura obtidos de acordo com o item 4.2 foram utilizados como entrada (*input*) para as previsões do período de pré-postura e incubação de ovos. A partir da modelagem de previsão dos períodos de pré-postura e período de incubação (em dias), o período de pré-eclosão das larvas foi definido. Este foi associado ao período de maturação larval, esta fixada em 5,16 dias de acordo com os dados de Cruz et al., (2020) e Sales et al., (2024), sob condições de temperatura e umidade de $24,13 - 30 \pm 1,16$ °C, $50,42 - 94,25 \pm 11,35$ %, respectivamente.

Através da soma entre o período de pré-eclosão, maturação larval e período médio da fase parasitária de *R.(B) microplus*, a duração completa do ciclo foi definida (uma geração) (Garcia et al., 2016). O período médio da fase parasitária foi definido como 22 dias, período entre a fixação das larvas nos hospedeiros e a queda das fêmeas ingurgitadas (Garcia et al., 2016).

Após, o número de gerações anuais de *R.(B) microplus* para cada quadrante do Brasil foram estimados, de acordo com a seguinte equação: Número gerações = 365 dias/ período fase não parasitária + período fase parasitária dias (Cruz et al., 2020; Labruna et al., 2020).

4.6. Validação da predição do número de gerações de carrapatos no Brasil

Foram analisados estudos de campo sobre a fase não parasitária do carrapato *R.(B). microplus* no Brasil. Em casos onde o número de gerações anuais foi calculado, esses dados foram extraídos e utilizados para validação. Foram utilizados os seguintes estudos: Pereira et al. (2008) em Franca, São Paulo; Gomes et al. (2016) em Formiga, Minas Gerais; Nicaretta et al. (2018) em Goiânia, Goiás; Farias et al. (2018) em Lages, Santa Catarina; Cruz et al. (2020) em Jaboticabal, São Paulo; Sales et al. (2024) em São Luís, Maranhão e Aquino et al. (2024) em Goiânia, Goiás.

Para os estudos de Souza et al. (1988) no Planalto Catarinense, Santarém et al. (2003) em Botucatu, São Paulo, e Rodrigues et al. (2022) em Uberlândia, Minas Gerais, foram utilizados os dados de pré-eclosão (pré-postura + incubação) de 100, $42,03 \pm 7,28$ e $49,41 \pm 15,94$ dias, respectivamente e maturação larval de 5,16 para os estudos de Souza et al. (1988) e

Santarém et al. (2003) e $8,60 \pm 1,66$ dias para o estudo de Rodrigues et al. (2022) para então calcular o número de gerações, de acordo com a fórmula citada anteriormente.

O número de gerações foi simulado utilizando as equações matemáticas de previsão para cada estudo mencionado anteriormente, utilizando-se os dados de temperatura das estações meteorológicas correspondentes aos municípios e períodos em que os estudos foram realizados. Os resultados obtidos foram comparados com os dados observados por meio do RMSE, MAE R^2 , segundo a metodologia adaptada de Miotti et al., (2024).

5. RESULTADOS

5.1. Submodelo fase não parasitária

Foram coletados dados da biologia da fase não parasitária de *R. (B.) microplus* (n=189) em 10 cidades de seis estados e o Distrito Federal, dispostos na Tabela 1. Os períodos de maturação das larvas de *R. (B.) microplus* não foram inclusos no submodelo devido a não significância estatística de correlação com a temperatura ($R^2 < 0,70$, $p > 0,05$), de acordo com nossos resultados (Figura 2A).

A partir dos modelos de regressões polinomiais de grau 3 foi possível prever a duração dos períodos de pré-postura e incubação de ovos em função da temperatura. As equações matemáticas de predição dos modelos estão apresentadas na tabela 2 e as análises por regressão não linear na figura 2. Os períodos de pré-postura e incubação de ovos foi inversamente correlacionável com a temperatura (Figura 2). Os dados não apresentaram distribuição gaussiana (normalidade) ($p < 0,05$) (Tabela 2) para o teste de Shapiro-Wilk.

Valores de r (coeficiente de correlação) para o teste de Spearman demonstraram correlações negativas entre a temperatura e os períodos de pré-postura ($r = -0,7748$) e incubação de ovos ($r = -0,8515$), além da intensidade de correlação entre as variáveis, sendo correlação negativa muito forte para pré-postura e incubação de ovos diante da temperatura (Tabela 2).

Tabela 1. Dados da biologia de *R. (B.) microplus* na fase não parasitária em diferentes condições de temperatura. SP – São Paulo; MG – Minas Gerais; SC – Santa Catarina; MA – Maranhão; DF – Distrito Federal; PB – Paraíba; PI – Piauí.

Temperatura (°C)	Pré-postura (dias)	Incubação (dias)	Localidade	Referências
11,2 – 20,9	3,0 – 60,0	32,0 – 200,0	Lages (SC)	Farias et al., 2018
16,0 – 20,0	3,3 – 11,0	21,0 – 48,1	Botucatu (SP)	Santarém et al., 2003
17,4 – 24,8	3,8 – 13,0	29,8 – 90,0	Coronel P. (MG)	Brovini et al., 2003
17,5 – 27,0	-	62,5 – 110,0	Franca (SP)	Pereira et al., 2008
19,7 – 24,1	-	45,5 – 68,3	Planaltina (DF)	Saueressing et al., 1994
22,0 – 30,0	2,1 - 3,5	27,3 – 66,0	Jaboticabal (SP)	Cruz et al., 2020
23,4 – 25,7	3,2 – 3,3	34,3 – 72,4	Uberlândia (MG)	Fernandes et al., 2020
24,1 – 28,5	2,1 – 5,0	18,0 – 59,8	São Luís (MA)	Sales et al., 2024
26,0 – 32,5	-	20,3 – 56,0	Patos (PB)	Barros et al., 2017
27,2 – 28,6	3,0 – 3,5	22,6 – 39,9	Parnaíba (PI)	Castro et al., 2021

Tabela 2. Equações matemáticas de previsão a partir dos dados da biologia de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*.

Parâmetros biológicos (dias)	Equação matemática de predição	R ²	Teste Shapiro-Wilk (ps)	Teste Spearman (rs)
Período de pré-postura de ovos	$F(x) = -0,0131x^3 + 0,8835x^2 - 19,908x + 155,07$	0,7259	<0,0001	-0,7748 (p<0,0001)
Período de incubação de ovos	$F(x) = -0,0171x^3 + 1,3792x^2 - 39,858x + 445,31$	0,8029	<0,0001	-0,8515 (p<0,0001)

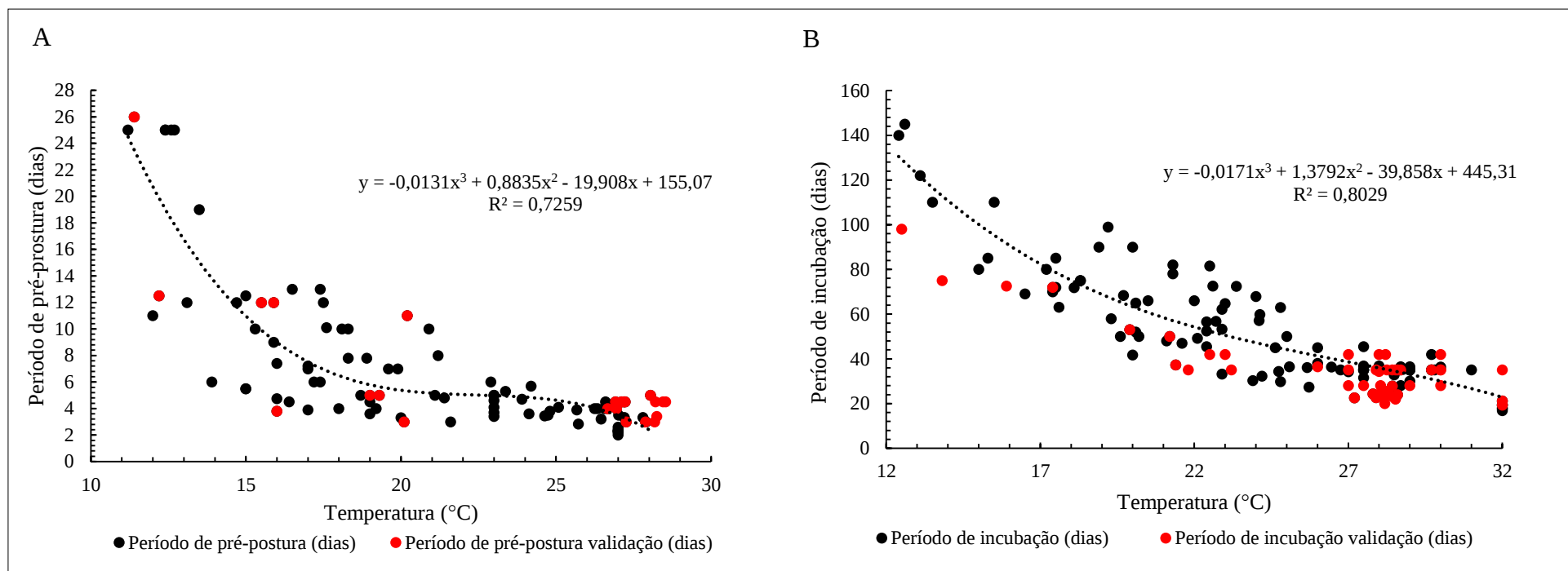


Figura 2. Regressões não lineares entre temperatura (°C) e os parâmetros biológicos pré-postura (A) e incubação de ovos (B) de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*. Y = Equação de previsão, R² = coeficiente de determinação. Em preto os dados dos períodos dos parâmetros biológicos utilizados para desenvolvimento das equações matemáticas de predição e em vermelho os dados de validação.

5.2. Validação do modelo de previsão

O desempenho do modelo foi avaliado utilizando os dados biológicos de estudos obtidos da literatura bibliográfica, formando o conjunto teste, comparando com os resultados de previsão obtidos pelas equações. O espaço amostral do conjunto teste para equação de previsão dos períodos de pré-postura (dias) e incubação (dias) em função da temperatura foram de 23 e 48, respectivamente. As comparações entre os dados dos estudos de validação e de previsão do modelo estão presentes na figura 3.

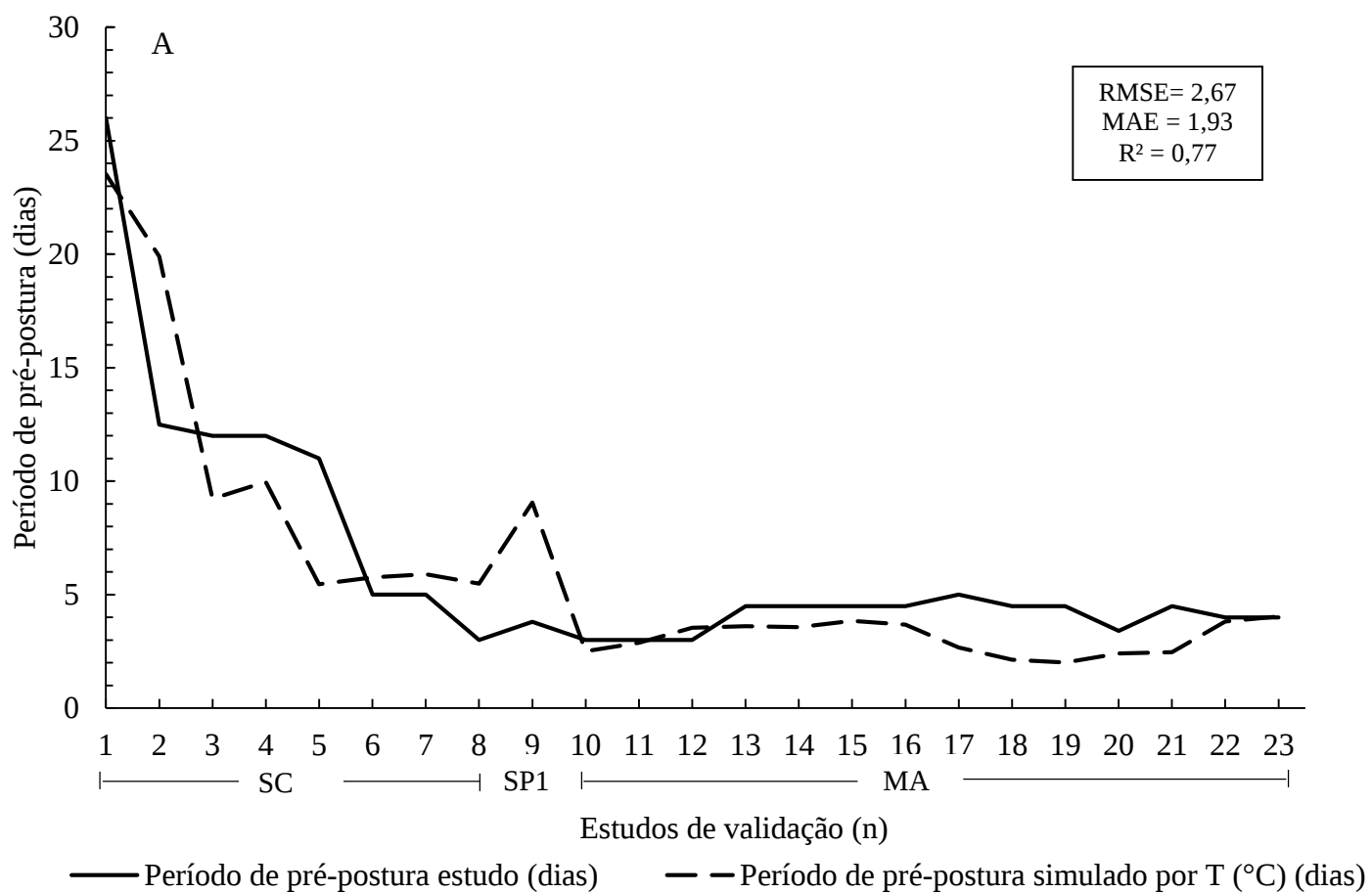
Os resultados indicam que o modelo ajustou-se aos dados publicados a campo. Os valores médios da raiz do erro quadrático médio (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e coeficiente de determinação (R^2) foram de 2,67, 1,93 e 0,77, respectivamente, para comparações entre períodos de pré-postura dos estudos e simulados (Figuras 3, 3A) e de 11,80, 9,21 e 0,80, respectivamente, para comparações entre períodos de incubação de ovos dos estudos e dos resultados simulados pelo modelo (Figuras 3, 4A).

Os valores de RMSE são calculados a partir dos erros entre as predições e os valores de referência (validação). Enquanto o MAE dá o mesmo peso a todos os erros, utilizando os erros absolutos, o RMSE penaliza a variância, por atribuir peso maiores aos erros com valores absolutos maiores do que aos erros com valores absolutos menores (Chai et al, 2014). O R^2 expressa a quantidade da variância dos dados de predições e os valores de referência (validação).

De maneira geral, quanto menores os RMSE e MAE, mais o modelo está fazendo previsões mais precisas, associado a isso, quanto maior for o valor de R^2 , mais explicativo ele é, indicando um melhor ajuste aos dados amostrais (Garcia-Martí et al., 2017).

5.3. Previsão do número de gerações do carrapato nas regiões do Brasil

Os resultados de predição do número de gerações anuais estão presente na figura 4. A estimativa do número de gerações anuais das regiões do Brasil foi entre 2,92 (região Sul) e 6,18 gerações (região Norte), com os períodos de pré-eclosão (período de pré-postura + período de incubação) mais curto de 31,82 (região Norte) e mais longo de 97,66 dias (região Sul). A média do número de gerações anuais do carrapato bovino por bioma está presente na tabela 3.



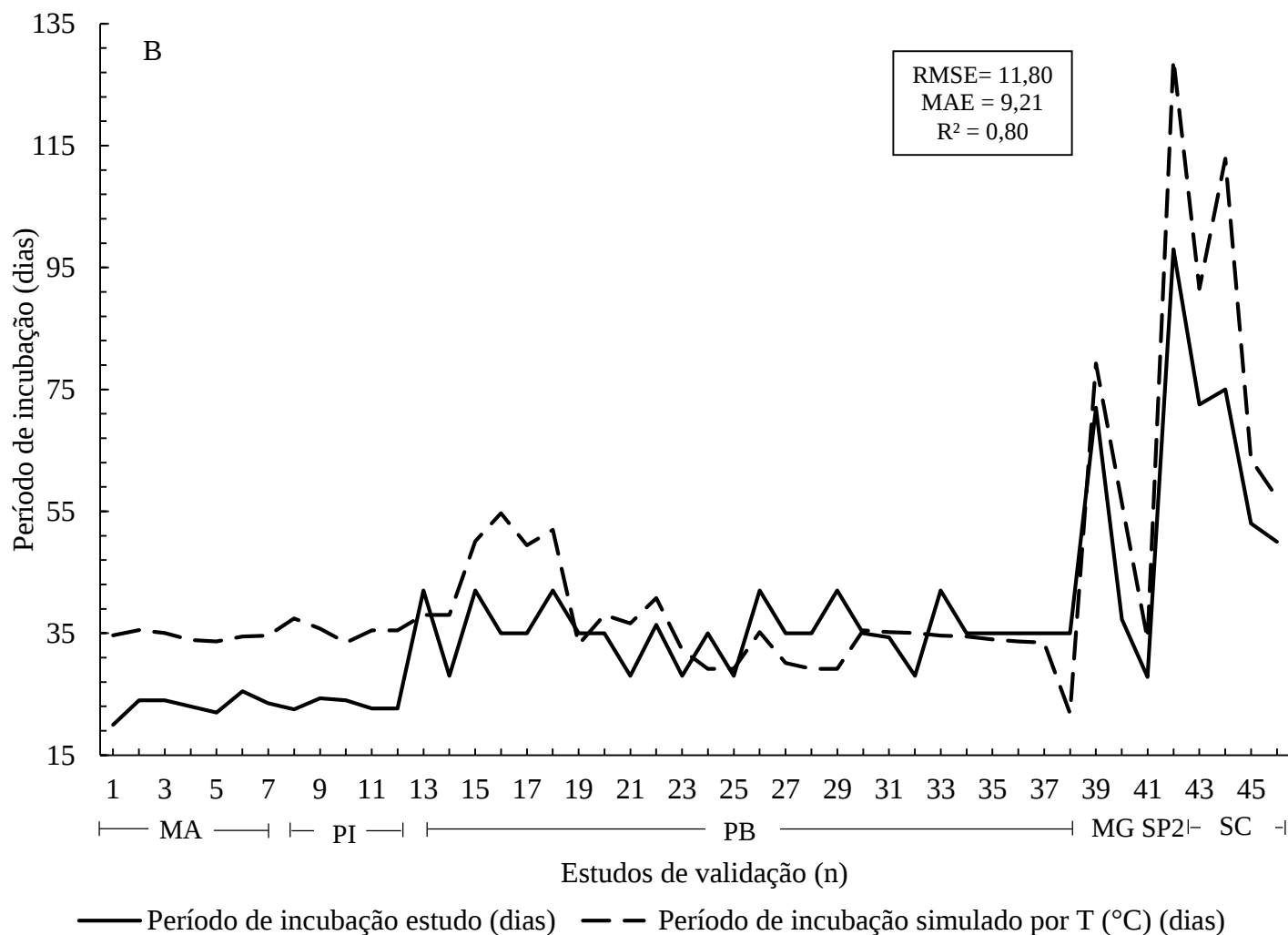


Figura 3. Período de pré-postura (A) e incubação de ovos (B) simulado pelo modelo de previsão (-----) e os encontrados nos estudos de Farias et al., 2018 (Lages, SC- SC); Sales et al., 2024 (São Luís, MA - MA); Santarém et al., 2003 (Botucatu, SP – SP1); Brovini et al., 2003 (Coronel Pacheco, MG - MG); Castro et al., 2021 (Parnaíba, PI - PI); Cruz et al., 2020 (Jaboticabal, SP - SP2), Barros et al., 2017 (Patos, Paraíba - PB); T (°C) – Temperatura. Quantidade de dados para o conjunto teste e validação de cada estudo está presente na Tabela 1A.

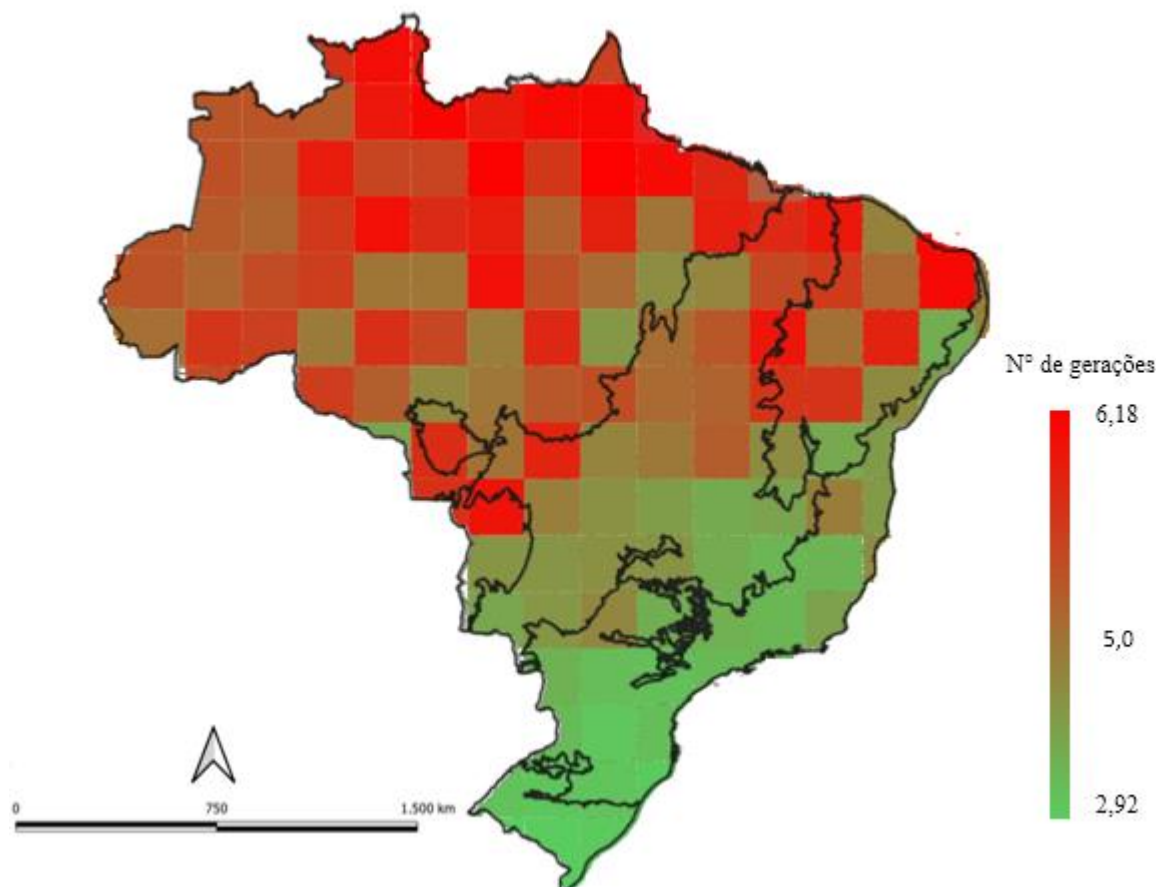


Figura 4. Predição do número de gerações anuais de *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* no Brasil, contendo 136 quadrantes delimitados por 2,5° de resolução.

Tabela 3. Número de gerações anuais do carrapato bovino nos biomas brasileiros.

Biomas	Número de gerações
Amazônia	5,46 ± 0,29
Pantanal	5,39 ± 0,51
Caatinga	5,25 ± 0,49
Cerrado	5,05 ± 0,41
Mata Atlântica	4,38 ± 0,64
Pampa	3,14 ± 0,21

5.4. Validação da predição do número de gerações do carrapato no Brasil

O número de gerações anuais previsto pelo modelo e os observados nos estudos de biologia de *R. (B.) microplus* estão dispostos na tabela 4. Estatisticamente, os resultados indicam que o modelo é apropriado para ajustar-se aos dados observados em campo. Os valores médios da raiz do erro quadrático médio (RMSE), Erro Absoluto Médio (MAE) e coeficiente de determinação (R^2) foram em média 0,503, 0,378 e 0,71, respectivamente, para comparações entre o número de gerações anuais dos estudos e do simulado, indicando uma boa concordância geral entre os dados empíricos e os valores previstos pelo modelo.

Tabela 4. Número de gerações anuais dos estudos e simulado pelo modelo de previsão. * - Calculados a partir dos dados dos estudos; Erro Ab.- Erro Absoluto; MAE = Erro Absoluto Médio; RMSE = Raiz do erro quadrático médio; R² = Coeficiente de determinação.

Estudo	Bioma	Localidade	Número de gerações			
			Estudo	Simulado	Erro Ab.	
Sales et al. (2024)	Amazônia	São Luís, MA	5,80	5,48	0,321	
Cruz et al. (2020)		Jaboticabal, SP	5,19	5,07	0,120	
De Aquino et al. (2024)		Goiânia, GO	5,03	4,79	0,237	
Pereira (2008)		Franca, SP	4,00	4,19	0,191	
Gomes et al. (2016)		Cerrado	Formiga, MG	5,00	4,16	0,841
Nicaretta (2018)			Goiânia, GO	5,00	4,79	0,209
Santarém et al. (2003) *			Botucatu, SP	5,28	4,27	1,005
Rodrigues (2022) *			Uberlândia, MG	4,56	4,53	0,029
Souza et al. (1988) *	Mata Atlântica	Plan. Catarinense	2,87	3,61	0,740	
Farias et al. (2018)		Lages, SC	3,00	2,91	0,086	
MAE					0,378	
RMSE					0,503	
R²					0,71	

6. DISCUSSÃO

A fim de elucidar a dinâmica populacional do carrapato bovino *R. (B.) microplus* em sua fase não parasitária no Brasil e auxiliar no desenvolvimento de programas de controle estratégicos eficientes para o controle parasitário (Estrada-Peña et al. 2022, Calvano et al., 2021), esse foi o primeiro estudo a desenvolver um modelo de previsão do número de gerações de *R. (B.) microplus* em todo o Brasil.

Nesse intuito, visto que a temperatura é essencial na fase não parasitária de *R. (B.) microplus*, modelando a dinâmica populacional deste ectoparasito (Nicaretta et al., 2021; Andreotti et al., 2019), essa variável foi definida como parte central no desenvolvimento do modelo de predição. Enquanto a umidade relativa e precipitação atuam na viabilidade dos ovos e na sobrevivência de larvas, a temperatura possui grande influência nas taxas de desenvolvimento do parasito, especialmente durante sua fase não parasitária, que é encurtada sob altas temperaturas ou prolongada sob baixas temperaturas (Sales et al., 2024), impactando diretamente o número de gerações anuais dos carrapatos.

A temperatura e os parâmetros biológicos de períodos de pré-postura ($r_s = -0,7748$; $R^2 = 0,7259$) e incubação de ovos ($r_s = -0,8515$; $R^2 = 0,8029$, tabela 2, figuras 2) apresentaram relação monotônica decrescente, em que o valor do coeficiente de Spearman (r_s) avaliou a força e direção das variáveis, evidenciando a correlação negativa entre esses parâmetros biológicos e a temperatura. Corroborando com os resultados de Cruz et al. (2020), nesse

estudo foi identificado correlações negativas significativas entre a temperatura e os períodos de incubação ($r=-0,8729$; $R^2= 0,7619$) de *R. (B.) microplus*.

Além disso, modelos de previsão da dinâmica de Ixodidae já utilizam RMSE, MAE e R^2 como coeficientes para validação de simulações (Miotti et al., 2024; Garcia-Martí et al., 2017; Daniel et al., 2010; Beugnet et al. 2009). Brugger et al. (2018), em seu estudo de predição da densidade de *Ixodes ricinus* na Alemanha, estimaram raiz do erro quadrático médio (RMSE) igual a 21. Em outro estudo, Miotti et al. (2024), na Argentina, estimaram o RMSE de 20 a 32 e R^2 de 0,60, resultados semelhantes ao limite de raiz do erro quadrático médio (RMSE) entre a previsão dos períodos de incubação (RMSE = 11,80) e pré-postura (RMSE = 2,67) do nosso estudo (figura 3).

No estudo de Sales et al (2024) foram estimados para os períodos de pré-postura entre 3 a 5 dias e para incubação de ovos de 18 a 25,50 dias, em São Luís, Maranhão, em temperaturas de 26 a 28 °C, resultados similares da previsão desses períodos foram obtidos no nosso estudo (figura 3, MA), prevendo de 2,5 a 3,82 dias o período de pré-postura, 34,60 a 35,52 dias o período de incubação de ovos. Representando diferenças entre os períodos simulados e do estudo de referência de 1 dia para pré-postura (RMSE = 2,67, MAE = 1,93 e $R^2 = 0,77$) (figura 3) e 10 dias para incubação de ovos (RMSE = 11,80, MAE = 9,21 e $R^2 = 0,80$) (figura 3).

Os resultados do presente estudo também corroboraram com achados de Castro et al (2021) em Parnaíba, Piauí e Barros et al (2017) em Patos, Paraíba, regiões semiáridas do Brasil, onde foram estimados períodos de incubação de 22 a 35 dias, nas temperaturas de 26 a 28 °C e umidade relativa de 60 a 75 %.

Em temperaturas mais altas entre 28 a 32 °C as previsões do período de pré-postura foram mais curtas (2,5 dias) (MA), para os períodos de incubação foram entre 21 a 35 dias (PB, MA) (figura 3), corroborando com o estudo de Tavares et al (2023), que em condições de incubadora B.O.D em 27 e 32 °C foram estimados 2 e 2,4 dias para o período de pré-postura de ovos e 19 e 30 dias para o período de incubação de ovos de *R. (B.) microplus*.

Em baixas temperaturas a previsão dos períodos de pré-postura e incubação de ovos foram de 5,5 a 23,53 e 57,26 a 129,19 dias (SC), respectivamente (figura 3), resultados similares foram encontrados por Santarém et al (2003), Farias et al (2018) e Brunm et al (1978), nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Em que, em baixas temperaturas, os períodos de

pré-postura e incubação de ovos foram estimados em 11 a 26 dias e 35 a 100 dias, respectivamente.

O alongamento do período para completar as interfases do ciclo não parasitário de *R.(B.) microplus* em baixas temperaturas pode estar associado a queda do metabolismo e consequentemente retardo no desenvolvimento da fêmea, taxa de eclosão de ovos, postura, incubação e eclosão das larvas (Esteves et al., 2015; Sutherst et al, 2006).

Associado a isso, o prolongamento dos períodos de incubação dos ovos ou do tempo de pré-eclosão como um todo é prejudicial à fase não parasitária de *R. (B.) microplus*, podendo também aumentar as chances de predação sob o carrapato (Cruz et al., 2020, Cruz et al, 2017).

Nesse sentido, a predição por modelagem computacional, dos períodos de pré-postura e incubação de ovos, a partir de dados de temperatura (11,2 – 32,5 °C) (Tabela 1), permitiu prever mínimas de 2,92 (região sul) e máximas de 6,18 (região norte) gerações anuais do carrapato *R. (B.) microplus* em todo Brasil (Figura 4). Nas regiões Norte (Amazônia) observa-se um predomínio de áreas vermelhas, indicando um número maior de gerações anuais (aproximadamente entre 5 e 6,18) e média $5,46 \pm 0,29$. O bioma Caatinga é uma exceção, apesar de ser uma região semiárida, quando há eventuais precipitações, aumentando a umidade, o carrapato consegue completar seu ciclo, elevando o número de gerações anuais (Barros et al., 2017) (Figura 4), nessa região foram preditas $5,25 \pm 0,49$ gerações anuais do carrapato bovino (Tabela 3). Essas áreas coincidem com regiões de zonas equatoriais (Figura 4). Isso é explicado pela biologia do carrapato, que em clima mais quente há um encurtamento da fase não parasitária, favorecendo um número maior de gerações ao longo do ano (Sales et al., 2024).

Nas regiões Sul (Pampa), áreas predominantemente verdes e verde-claras, com um número menor de gerações (entre 2,92 e 4) e média de $3,14 \pm 0,21$ (tabela 3), correspondem com regiões temperadas, de temperaturas mais baixas. O clima mais frio tende a retardar o ciclo de vida do carrapato, limitando o número de gerações anuais (Sales et al., 2024). A maturação larval fixada em 5,16 dias para cálculo do número gerações pode ter sido uma limitação para a previsão nessas regiões, pois em períodos de frio intenso (< 12 °C), o período de maturação larval aumenta ou até mesmo não há eclosão nesses períodos. Brum (1979) realizou observações ao longo de um ano sobre a postura e a eclosão de *R. (B.) microplus* nas

idades de Pelotas e Santa Vitória do Palmar, no Rio Grande do Sul. Em Pelotas, a postura foi registrada em todos os meses do ano, embora em quatro desses meses não tenha ocorrido eclosão. Já em Santa Vitória do Palmar, não houve postura em dois meses, e em outros cinco, a postura ocorreu sem eclosão. Nesse município, a postura e a eclosão foram observadas apenas quando as temperaturas médias mensais superaram 12°C e 19°C, respectivamente.

No Centro-Oeste (Cerrado), áreas vermelhas e marrom indicam gerações entre 4,5 e 6 e média de $5,05 \pm 0,41$ (Figura 4, tabela 3), nessa região, durante a estação das chuvas, as condições de temperatura e umidade favorecem o aumento das gerações do carrapato, enquanto na estação seca, pode haver uma redução na taxa de reprodução. No entanto, a maior parte do ano apresenta temperaturas elevadas que promovem um número relativamente alto de gerações (Barros et al., 2017).

Cruz et al., (2020) em seu estudo, em Jaboticabal- SP, no Cerrado, estimaram 5,19 gerações anuais do carrapato bovino, corroborando com os resultados no nosso estudo, que para o mesmo período foi estimado 5,07 gerações (Tabela 4). No estudo de Sales et al., 2024, em São Luís, MA, na Amazônia, foram estimadas 5,8 gerações enquanto nosso estudo foram 5,48 (Tabela 4). No estudo de Aquino et al., 2024 e Nicaretta et al., 2018, em Goiânia, GO, no Cerrado, 5,03 gerações foram estimadas e no nosso estudo 4,79 gerações anuais (Tabela 4).

Farias et al., 2018, em Lages, SC, Mata Atlântica, 3 gerações anuais foram estimadas e no nosso estudo 2,914 gerações (Tabela 4). Pereira (2008) em Franca, SP, no Cerrado, estimaram 4 gerações anuais e no nosso estudo 4,19 (Tabela 4), já em Minas Gerais, em Formiga, no Cerrado, Gomes et al., 2016 estimaram 5 gerações e nosso estudo 4,16 gerações anuais (Tabela 4). No Planalto Catarinense, na Mata Atlântica, Souza et al, 1988 estimaram 2,87 gerações anuais enquanto nosso estudo estimou 3,61 gerações (Tabela 4). Santarém et al., 2003, em Botucatu, SP, no Cerrado, estimaram 5,27 gerações anuais, enquanto nosso estudo estimou 4,27 gerações (Tabela 4). Em Uberlândia, MG, no Cerrado, Rodrigues et al., 2022 estimaram 4,56 gerações anuais, enquanto o nosso estudo estimou 4,53 gerações (Tabela 4), com erro absoluto médio (MAE) de 0,378 gerações anuais em comparação com os achados nos estudos.

No Brasil, é conhecido que o *R. (B.) microplus* tem três gerações anuais na região Sul, enquanto no bioma Cerrado, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste, o número de gerações varia

entre quatro e cinco por ano (Kasai et al., 2000; Pereira et al., 2008; Gomes et al., 2016; Gonzales, 1993; Souza et al., 1988; Cruz et al., 2020). No bioma da Caatinga, o número de gerações está relacionado à duração da estação chuvosa, possibilitando mais gerações de carrapatos em períodos de chuvas prolongadas, mesmo na região semiárida (Barros et al., 2017). Recentemente, o estudo de Sales et al. (2024) estimaram 5,8 gerações anuais no nordeste do Brasil, na Amazônia. Essa variação no número de gerações entre as regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste pode estar relacionada a diferentes fatores climáticos, como temperatura, umidade e precipitação, em diferentes partes do país.

Nesse cenário, a temperatura desempenha um papel crucial, uma vez que seu aumento reduz a duração da fase não parasitária do *R. (B.) microplus*, resultando em um maior número de gerações por ano (Pereira et al., 2008; Sales et al., 2024). De fato, o número de gerações anuais desse carrapato aumenta à medida que se avança do sul para o norte do Brasil (Figura 4), sugerindo que, em condições de temperaturas elevadas ao longo do ano, esse ectoparasito tende a encurtar sua fase não parasitária.

No presente estudo, a predição do número de gerações anuais em todo o Brasil, onde o carrapato consegue completar seu ciclo não parasitário de maneira mais rápida nas regiões de localização equatorial (Figura 4) (Geirinhas et al., 2018) reforçam uma possível adaptação gradual deste ectoparasito às mudanças climáticas, particularmente de temperatura, evidenciado pelo aumento do número de gerações com o aumento da temperatura. Diante dessa situação, a previsão do número de gerações auxilia no planejamento estratégico de controle, uma vez que antecipa para o proprietário a quantidade de picos de carrapatos propício naquela região, o que pode despertar o interesse na adoção de novos critérios para o controle estratégico de *R. (B.) microplus*, como alteração no tipo de manejo. Cruz-González et al., (2023) verificou uma baixa infestação de carrapatos caracterizado pelo pastoreio rotativo com 45 dias de descanso em um estudo em região de condições tropicais úmidas.

Novos estudos de modelagem computacional com ênfase na dinâmica populacional de *R. (B.) microplus* são necessários para previsão da quantidade de carrapatos em cada pico de gerações e os períodos potenciais para tratamento acaricida, a fim de evitar adicionais gerações de carrapatos por ano, diminuindo os impactos econômicos na bovinocultura.

7. CONCLUSÃO

Fica nítido, portanto, que a temperatura pode influenciar diretamente na fase não parasitária do ciclo de vida de *R. (B.) microplus* e através da modelagem computacional foi possível prever de 2,92 (região sul) a 6,18 (região norte) gerações anuais desse ixodídeo em todo Brasil, influenciada pelo aumento da temperatura e encurtamento da fase não parasitária.

8. REFERÊNCIAS

- ANDREOTTI, A. et al. **Carrapatos na cadeia produtiva de bovinos**. Carrapatos: protocolos e técnicas para estudo. Embrapa, Brasília, pp 179–194, 2019.
- ARANDA, D. F.; TREJOS, D. Y.; VALVERDE, J. C. A discrete epidemic model for bovine Babesiosis disease and tick populations. **Open Physics**, v. 15, n. 1, p. 360–369, 2017.
- ARANTES, G. J.; MARQUES, A. O.; HONER, M. R. O carrapato do bovino, *Boophilus microplus*, no município de Uberlândia, MG: análise da sua resistência contra carrapaticidas comerciais. **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 4, p. 89–93, 1995.
- BAMBINI, M. D. et al. **Sistema Agritempo: rede de inovação em agrometeorologia**, 2014.
- BROVINI, C. N.; FURLONG, J.; DE SOUZA CHAGAS, A. C. Influencia dos fatores climáticos na biologia e no comportamento de fêmeas ingurgitadas de *Boophilus microplus* a Campo. **Biosci.J. Uberlândia**, v. 19, n. 1, p. 71–76, 2003.
- BRUGGER, K. et al. Forecasting next season's *Ixodes ricinus* nymphal density: the example of southern Germany 2018. **Experimental & applied acarology**, v. 75, n. 3, p. 281–288, 2018.
- BRUNM, J. G et al, **Biologia fase não parasitária *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* no Rio Grande do Sul**. Tese doutorado. 1978.
- BRUM, J.G.W. **Postura e eclosão de *Boophilus microplus* (Can. 1887) em diferentes localizações geográficas do Rio Grande do Sul**. 1979. 30p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1979.
- BRUM, J.G.W. GONZALES, J.C.; PETRUZZI, M.A. **Postura e eclosão de *Boophilus microplus* (Can. 1887) em diferentes localizações geográficas do Rio Grande do Sul, Brasil**. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.37, p.581-587, 1985.
- CALVANO, M. P. C. A. et al. Bioeconomic simulation of *Rhipicephalus microplus* infestation in different beef cattle production systems in the Brazilian Cerrado. **Agricultural systems**, v. 194, n. 103247, p. 103247, 2021.
- CARNEIRO, J. R. et al. Ocorrência de Ixodidae e variação estacional do *Boophilus microplus* (Can., 1888) em bovinos da bacia leiteira de Goiânia-GO. **Revista de Patologia Tropical**, n. 2, p. 235–242, 1992.
- CASTRO, K.N.C. et al. **Influência das condições climáticas no comportamento do carrapato bovino em Parnaíba, Piauí**. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 164. 2021.
- CENTENARO, F. C. et al. Rotational and selective protocols using acaricides to control a multi-resistant strain of *Rhipicephalus microplus* under field conditions in Southern Brazil. **Ticks and tick-borne diseases**, v. 13, n. 5, p. 101987, 2022.
- CHAI, T.; DRAXLER, R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific model development**, v. 7, n. 3, p. 1247–1250, 2014.
- CHEVILLON, C. et al. Understanding the genetic, demographical and/or ecological processes at play in invasions: lessons from the southern cattle tick *Rhipicephalus microplus* (Acari: Ixodidae). **Experimental & applied acarology**, v. 59, n. 1–2, p. 203–218, 2013.
- COPEMAN, D. B. et al. Reported distribution of *Ixodes scapularis* and *Ixodes pacificus* ticks (Acari: Ixodidae) in the United States. **Journal of Medical Entomology**, v. 35, p. 629–638,

1978.

CORSON, M. S.; TEEL, P. D.; GRANT, W. E. Microclimate influence in a physiological model of cattlefever tick (*Boophilus* spp.) population dynamics. **Ecological Modelling**, v. 180, p. 487–514, 2004.

CORSON, M. S.; TEEL, P. D.; GRANT, W. E. Simulating detection of cattle-fever tick (*Boophilus* spp.) infestations in rotational grazing systems. **Ecological modelling**, v. 167, n. 3, p. 277–286, 2003.

CRUZ, B. C. et al. Biological parameters for *Rhipicephalus microplus* in the field and laboratory and estimation of its annual number of generations in a tropical region. **Parasitology research**, v. 119, n. 8, p. 2421–2430, 2020.

CRUZ, B. C. et al. Susceptibility of *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* to ivermectin (200, 500 and 630µg/kg) in field studies in Brazil. **Veterinary parasitology**, v. 207, n. 3–4, p. 309–317, 2015.

CRUZ-GONZÁLEZ, G. et al. Rotational Grazing Modifies *Rhipicephalus microplus* Infestation in Cattle in the Humid Tropics. *Animals* 13, no. 5: 915. 2023.
<https://doi.org/10.3390/ani13050915>.

DALLWITZ, M. J. Modelling tick management. 4. TICK2. Pages 145 in *Ticks and tick-borne diseases*. **ACIAR**, 1987c.

DALLWITZ, M. J. Modelling tick-borne diseases in TICK2. Pages 88-89 in *Ticks and tick-borne diseases*. **ACIAR**, 1987b.

DALLWITZ, M. J. **Ecological models. 3. TICK2-a general program for modelling ticks and tick-borne diseases. Pages 77-78 in Ticks and tick-borne diseases.** **ACIAR**, Canberra, Australian Capital Territory, Australia: [s.n.].

DELGADO, F. E. F. Avaliação do controle estratégico do *Boophilus microplus* (Canestrini, 1887), pelo programa BABSIM, em propriedades dos Campos das Vertentes e Sul Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, 2002.

DEREK SCASTA, J. Livestock parasite management on high-elevation rangelands: Ecological interactions of climate, habitat, and wildlife. **Journal of integrated pest management**, v. 6, n. 1, p. 8–8, 2015.

BARROS, M. N. D. L. et al. Off-host development and survival of *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* in the Brazilian semiarid. **Veterinary parasitology (Amsterdam: Online)**, v. 9, p. 17–24, 2017.

de Aquino, L. M., de Moraes, I. M. L., Salvador, V. F., Trindade, A. S. N., Leal, L. L. L. L., E Sousa, L. J. M. P., Vale, F. L., Zapa, D. M. B., Ferreira, L. L., Soares, V. E., Cruz, B. C., Borges, F. de A., Monteiro, C. M. de O., Costa-Junior, L. M., & Lopes, W. D. Z. (2024). Annual number of generations and biology of non-parasitic phase of *Rhipicephalus microplus* in irrigated and non-irrigated pasture in a tropical region. **Veterinary Parasitology**, 331(110278), 110278. <https://doi.org/10.1016/j.vetpar.2024.110278>.

DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). I. C alculo de las constantes termicas. **Revista de Salud Animal**, v. 7, p. 141–148, 1985a.

DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). II. Estimacion del inicio de la eclosi on en condiciones naturales simuladas. **Revista de Salud Animal**, v. 7, p. 307–316, 1985b.

- DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). III. Simplificaciones del metodo de estimacion de los periodos de la fase no parasitaria. **Revista de Salud Animal**, v. 7, p. 441–446, 1985c.
- DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). IV. Pronostico del inicio de la eclosion en condiciones de intemperie. **Revista de Salud Animal**, v. 8, p. 337–345, 1986.
- DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). V. Supervivencia larvaria en el laboratorio. **Revista de Salud Animal**, v. 9, p. 259–265, 1987.
- DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). VIII. Validacion del programa de cuarentena. **Revista de Salud Animal**, v. 14, p. 133–136, 1992.
- DE LA VEGA, R.; DIAZ, G. Aplicacion de las constantes termicas en el control de la garrapata del ganado vacuno (*Boophilus microplus*). VII. Despoblamiento. **Revista de Salud Animal**, v. 15, p. 163–171, 1993.
- DIAS FILHO, F. D. C. et al. OBTENÇÃO DE ISOLADOS PUROS DE *Babesia bovis* E *Babesia bigemina* A PARTIR DE LARVAS E NINFAS DE *Boophilus microplus* EM BEZERROS NEONATOS PRIVADOS DE COLOSTRO. **Revista de patologia tropical**, v. 34, n. 3, 2007.
- DOLENGA, C. J. R. et al. Acaricidal effect of major compounds to control *Rhipicephalus microplus* (Canestrini, 1887) in dairy cows and possible alternatives for reversing multidrug resistance. **Revista brasileira de parasitologia veterinaria [Brazilian journal of veterinary parasitology]**, v. 31, n. 2, 2022.
- DUBREUIL, V. et al. Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. **International journal of climatology: a journal of the Royal Meteorological Society**, v. 39, n. 3, p. 1446–1456, 2019.
- ELDER, J. K.; KNOTT, S. G.; KEARNAN, J. F. A coordinated approach to control of the cattle tick (*Boophilus microplus*) in south east Queensland. Em: **Third International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics**. Australia; Arlington, Virginia, USA: [s.n.].
- ELDER, J. K.; MORRIS, R. S. The use of decision analysis to compare cattle tick control strategies under conditions of risk. **Preventive veterinary medicine**, v. 3, n. 6, p. 523–535, 1986.
- ESTEVEZ, E. et al. Low temperature affects cattle tick reproduction but does not lead to transovarial transmission of *Anaplasma marginale*. **Veterinary parasitology**, v. 214, n. 3–4, p. 322–326, 2015.
- ESTRADA-PEÑA, A. Climate warming and changes in habitat suitability for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Central America. **The journal of parasitology**, v. 87, n. 5, p. 978–987, 2001.
- ESTRADA-PEÑA, A. et al. Changes in climate and habitat suitability for the cattle tick *Boophilus microplus* in its southern Neotropical distribution range. **Journal of vector ecology: journal of the Society for Vector Ecology**, v. 31, n. 1, p. 158–167, 2006.

ESTRADA-PEÑA, A. et al. One Health approach to identify research needs on Rhipicephalus microplus ticks in the Americas. **Pathogens**, v. 11, n. 10, p. 1180, 2022.

ESTRADA-PEÑA, A. Geostatistics and remote sensing as predictive tools of tick distribution: A cokriging system to estimate Ixodes scapularis (Acari: Ixodidae) habitat suitability in the United States and Canada from advanced very high resolution radiometer satellite imagery. **Journal of medical entomology**, v. 35, n. 6, p. 989–995, 1998.

ESTRADA-PEÑA, A. Geostatistics and remote sensing using NOAA-AVHRR satellite imagery as predictive tools in tick distribution and habitat suitability estimations for Boophilus microplus (Acari: Ixodidae) in South America. National Oceanographic and Atmosphere Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer. **Veterinary parasitology**, v. 81, n. 1, p. 73–82, 1999.

ESTRADA-PEÑA, A. Prediction of habitat suitability for ticks. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1078, n. 1, p. 275–284, 2006.

ESTRADA-PEÑA, A. et al. Perspectives on modelling the distribution of ticks for large areas: so far so good? **Parasites & vectors**, v. 9, n. 1, 2016.

ESTRADA-PEÑA, A.; GARCÍA, Z.; SÁNCHEZ, H. F. The distribution and ecological preferences of Boophilus microplus (Acari: Ixodidae) in Mexico. **Experimental & applied acarology**, v. 38, n. 4, p. 307–316, 2006.

EVANS, D. E. Tick infestation of livestock and tick control methods in Brazil: A situation report. **International Journal of Tropical Insect Science**, v. 13, i. 4, p. 629-643, 1992.

FARIAS, J. A. **Estudo retrospectivo e prospectivo da fase de vida livre do Rhipicephalus (Boophilus) microplus e análise da percepção dos produtores rurais quanto ao controle do carrapato no planalto serrano do estado de Santa Catarina**. Tese (Doutorado em Ciência Animal, Centro de Ciências Agroveterinárias), Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.

F. G. ASSIS, L. F. et al. TerraBrasilis: A spatial data analytics infrastructure for large-scale thematic mapping. **ISPRS international journal of geo-information**, v. 8, n. 11, p. 513, 2019.

FERNANDES, Laís K. **Dinâmica Sazonal do carrapato do Boi em Uberlândia, MG: Base Para o controle estratégico no Triângulo Mineiro**. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Medicina Veterinária da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

FONSECA, A. H. et al. Dinâmica populacional do carrapato Boophilus microplus (Acari: Ixodidae) em São Miguel do Anta, MG. **Brasil. Revista da Universidade Rural, série ciências da vida**, p. 31–39, 1999.

FONSECA, A. H. et al. Desempenho do programa BABSIM no estudo epidemiológico de Boophilus microplus (Canestrini, 1889) (Acari: Ixodidae). **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 52:342–349, 2000.

FURLONG, J.; MARTINS, J. R. S.; PRATA, M. C. A. Carrapato dos bovinos: controle estratégico nas diferentes regiões brasileiras. **Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite**, v. 6, 2003.

GARCIA M, V. et al. **Biologia e importância do carrapato Rhipicephalus (Boophilus) microplus**. Em: Carrapatos na cadeia produtiva de bovinos. Brasília, Distrito Federal: 2019. p. 17–27.

GARCIA-MARTÍ, I. et al. Modelling and mapping tick dynamics using volunteered observations. **International journal of health geographics**, v. 16, n. 1, 2017.

GEIRINHAS, J. L. et al. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil: CHARACTERIZATION OF HEAT WAVES IN BRAZIL. **International journal of climatology: a journal of the Royal Meteorological Society**, v. 38, n. 4, p. 1760–1776, 2018.

GOMES, L. V. C. et al. Population dynamics and evaluation of the partial selective treatment of crossbreed steers naturally infested with *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in a herd from the state of Minas Gerais in Brazil. **Veterinary parasitology**, v. 220, p. 72–76, 2016.

GONÇALVES, J. A. et al. The genus *Cyclocephala* Dejean (Coleoptera: Scarabaeidae: Dynastinae) in Brazil: diversity and spatio-temporal distribution. **Journal of insect conservation**, v. 24, n. 3, p. 547–559, 2020.

GONZALES, J. C. O controle dos carrapatos dos bovinos. Porto Alegre: Sulina, 1975.

GRISI, L. et al. Reassessment of the potential economic impact of cattle parasites in Brazil. **Revista brasileira de parasitologia veterinária. Brazilian journal of veterinary parasitology**, v. 23, n. 2, p. 150–156, 2014.

HAILE, D. G.; MOUNT, G. A.; COOKSEY, L. M. Computer simulation of *Babesia bovis* (Babes) and *B. bigemina* (Smith & Kilborne) transmission by *Boophilus* cattle ticks (Acari: Ixodidae). **Journal of Medical Entomology**, v. 29, p. 246–258, 1992.

HERNANDEZ-ARRIETA, F. J. et al. Simulation of rotational grazing to evaluate integrated pest management strategies for *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) in Venezuela. **Veterinary Parasitology**, v. 92, p. 139–149, 2000.

HITCHCOCK. **Studies of the non-parasitic stages on the cattle tick, boophilus microplus (Canestrini) (Acarina : ixodidae)**. Manuscript December 31, 1954.

HONER, M. R. et al. **Epidemiologia e controle do carrapato de bovinos *Boophilus microplus* no Estado de Santa Catarina**. Florianópolis, Santa Catarina, Brazil: [s.n.].

HONER, M. R.; GOMES, A. **O manejo integrado de moscas-dos-chifres, berne e carrapato em gado de corte**. [s.l.] Page 60 Circulara Tecnica, 1990.

HORTON, N. J.; KLEINMAN, K. Using R and RStudio for data management, statistical analysis, and graphics. **CRC Press**, 2015.

IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2013 – The Physical Science Basis**. [s.l.] Cambridge University Press, 2014. p. 1–30.

JAIN, SANDHYA & GUPTA, ALPANA & JAIN, DESHRAJ. Common statistical tests in dental research. **Journal of Advanced Medical and Dental Sciences Research**, v. 3, p. 45–48, 2015.

KASAI, N. et al. Dinâmica populacional de *Boophilus microplus* (Canestrini, 1887) em bovinos leiteiros mantidos em manejo de pastejo rotativo de capim-elefante. **Arquivo brasileiro de medicina veterinária e zootecnia**, v. 52, n. 5, p. 453–458, 2000.

KLAFKE, G. et al. Multiple resistance to acaricides in field populations of *Rhipicephalus microplus* from Rio Grande do Sul state, Southern Brazil. **Ticks and tick-borne diseases**, v. 8, n. 1, p. 73–80, 2017.

KRIGE, D.G. A Statistical Approaches to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, 52, 119-139, 1951.

LABARTA, V., et al. Simulation of control strategies for the cattle tick *Boophilus microplus* employing vaccination with a recombinant Bm86 antigen preparation. **Veterinary Parasitology** 63:131–160, 1996.

LABRUNA, M. B.; FACCINI, J. L. H. The nonparasitic phase of *Dermacentor nitens* under field conditions in southeastern Brazil. **Revista brasileira de parasitologia veterinária [Brazilian journal of veterinary parasitology]**, v. 29, n. 4, p. e008620, 2020.

LABRUNA, M. B.; VERÍSSIMO, C. J. Observações sobre a infestação por *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) em bovinos mantidos em rotação de pastagem, sob alta densidade animal. **Arquivos do Instituto Biológico**, p. 115–120, 2001.

LAJEUNESSE, M.J. (2021) Squeezing data from scientific images with the juicr package for R. R package, v. 0.1.

LEAL, L. L. L. et al. What is the optimal timing to initiate strategic control of *Rhipicephalus microplus* in taurine cattle in a tropical region? **Experimental & applied acarology**, v. 92, n. 2, p. 217–232, 2024.

LIMA, W. S.; RIBEIRO, M. F.; GUIMARAES, M. P. Seasonal variation of *Boophilus microplus* (Canestrini, 1887) (Acari: Ixodidae) in cattle in Minas Gerais State, Brazil. **Tropical animal health and production**, v. 32, n. 6, p. 375–380, 2000.

LODOS, J. et al. A model to simulate the effect of vaccination against *Boophilus* ticks on cattle. **Veterinary Parasitology** 87:315–326, 2000.

LODOS, J. et al. A simulation study of the effects of acaricides and vaccination on *Boophilus* cattle-tick populations. **Preventive Veterinary Medicine** 38:47–63, 1999.

LODOS, J. et al. Computer simulation of *Boophilus microplus* cattle tick population dynamics employing acaricides and vaccination control methods. Pages 131–145 in *Recombinant vaccines for the control of the cattle tick*. Elfos Scientiae, Havana, Cuba, 1995.

LOGIUDICE, K. et al. The ecology of infectious disease: effects of host diversity and community composition on Lyme disease risk. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 100, n. 2, p. 567–571, 2003.

MARQUES, R. et al. Climate change implications for the distribution of the babesiosis and anaplasmosis tick vector, *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus*. **Veterinary research**, v. 51, n. 1, 2020.

MARTHO, J. A. R. Ecologia de carrapatos XVI - uma câmara úmida portátil para observações de postura e desenvolvimento embrionário de carrapatos ao ar livre. *Ars Vet.* **Jaboticabal**, n. 2, p. 221–231, 1986.

MARVULLO, A. H. F. **Distribuição anatômica e dinâmica populacional do *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* em bovinos do município de Óleo, São Paulo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Saúde e Produção de Ruminantes), Universidade Norte do Paraná, Univ. Estadual de Londrina, Arapongas, 2014.

MASTROPAOLO, M. et al. Non-parasitic life cycle of the cattle tick *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* in *Panicum maximum* pastures in northern Argentina. **Research in veterinary science**, v. 115, p. 138–145, 2017.

MATHERON, G. The intrinsic random functions and their applications. **Advances in applied probability**, v. 5, n. 3, p. 439–468, 1973.

MAYWALD, G. F.; SUTHERST, R. W. CLIMEX: recent developments in a computer program for comparing climates in ecology. Em: **Pages 134-140 in Proceedings of the**

Simulation Society of Australia/ IMACS Eighth Biennial Conference. Canberra, Australia: [s.n.].

MIOTTI, C. et al. Stochastic modelling to predict a priori the potential outcomes of different control schemes against the cattle tick *Rhipicephalus microplus*. **Veterinary parasitology**, v. 326, p. 110095, 2024.

MIRABALLES, C.; RIET-CORREA, F. A review of the history of research and control of *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*, babesiosis and anaplasmosis in Uruguay. **Experimental & applied acarology**, v. 75, n. 4, p. 383–398, 2018.

MOUNT, G. A. et al. Computer simulation of *Boophilus* cattle tick (Acari: Ixodidae) population dynamics. **Journal of medical entomology**, v. 28, n. 2, p. 223–240, 1991.

MURRELL, A.; BARKER, S. C. Synonymy of *Boophilus* Curtice, 1891 with *Rhipicephalus* Koch, 1844 (Acari: Ixodidae). **Systematic Parasitology**, v. 56, n. 1, 2003. 169-172 p.

NAVA, S. et al. Effect of deforestation and introduction of exotic grasses as livestock forage on the population dynamics of the cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* (Acari: Ixodidae) in northern Argentina. **Research in veterinary science**, v. 95, n. 3, p. 1046–1054, 2013.

NAVA, S. et al. Assessment of habitat suitability for the cattle tick *Rhipicephalus (Boophilus) microplus* in temperate areas. **Research in veterinary science**, v. 150, p. 10–21, 2022.

NICARETTA, João Eduardo. **DINÂMICA POPULACIONAL DE *Rhipicephalus microplus* EM UMA REGIÃO DE CLIMA TROPICAL SEMIÚMIDO**. 2018.

Dissertação (Mestrado em Ciência Animal) - Escola de Veterinária e Zootecnia da Universidade Federal de

Goiás, Goiânia, 2018.

NICARETTA, J. E. et al. Evaluation of rotational grazing as a control strategy for *Rhipicephalus microplus* in a tropical region. **Research in veterinary science**, v. 131, p. 92–97, 2020.

NICARETTA, J. E. et al. *Rhipicephalus microplus* seasonal dynamic in a Cerrado biome, Brazil: An update data considering the global warming. **Veterinary parasitology**, v. 296, n. 109506, p. 109506, 2021.

NORTON, G. A.; SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. A framework for integrating control methods against the cattle tick, *Boophilus microplus* in Australia. **The journal of applied ecology**, v. 20, n. 2, p. 489, 1983.

NORTON, G. A.; SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F. **Pest and pathogen control: strategic, tactical, and policy models**. Chichester, UK: Wiley, 1984.

OSBURN, R. L.; KNIPLING, E. F. The potential use of sterile hybrid *Boophilus* ticks (Acari:Ixodidae) as a supplemental eradication technique. **Journal of Medical Entomology**, v. 19, p. 637–644, 1982.

PAPAKONSTANTINO, G. I. et al. Precision livestock farming technology: Applications and challenges of animal welfare and climate change. **Agriculture**, v. 14, n. 4, p. 620, 2024.

PEREIRA, C. M. et al. *Rhipicephalus (Boophilus) microplus*: Biologia, controle e resistência. São Paulo: **Med Vet**; 2008.

PEREIRA, Amílcar Alarcon. **ASPECTOS ECOLÓGICOS DE *Boophilus microplus* (CANESTRINI, 1887) (ACARINA: IXODIDAE) NO MUNICÍPIO DE FRANCA, NORDESTE DE SÃO PAULO**. 2008. Tese (Doutorado em Patologia Animal) - Faculdade

de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2008.

PFÄFFLE, M.; LITWIN, N.; MUDERS, S. V.; PETNEY, T. N. The ecology of tickborne diseases. **International Journal for Parasitology**, v. 43, p. 1059-1077, 2013.

PHILLIPS, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. **Ecological Modelling** 190:231-259. 2006.

POPHAM, T. W.; GARRIS, G. I. Considerations when modeling alternative eradication strategies for *Boophilus microplus* (Canestrini) (Acari: Ixodidae) in Puerto Rico. **Journal of Agricultural Entomology**, v. 8, p. 271–289, 1991.

QGIS Development Team, 2024. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

RECK, J. et al. First report of fluazuron resistance in *Rhipicephalus microplus*: a field tick population resistant to six classes of acaricides. **Veterinary parasitology**, v. 201, n. 1–2, p. 128–136, 2014.

RODRIGUEZ, M., et al. Control of *Boophilus microplus* populations in grazing cattle vaccinated with a recombinant Bm86 antigen preparation. *Veterinary Parasitology* 57:339–349, 1995.

RODRÍGUEZ-VIVAS, R. I. et al. Spatial distribution of acaricide profiles (*Boophilus microplus* strains susceptible or resistant to acaricides) in southeastern Mexico. **Veterinary parasitology**, v. 146, n. 1–2, p. 158–169, 2007.

RODRIGUES, Vinicius da Silva. **ECOLOGIA, SAZONALIDADE E RESISTÊNCIA A ACARICIDAS DE CARRAPATOS EM PROPRIEDADES RURAIS DO TRIÂNGULO MINEIRO**. 2022. Tese (Doutorado em Imunologia e Parasitologia Aplicadas) - Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SALES, D. P. et al. Biology of the non-parasitic phase of the cattle tick *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* in an area of Amazon influence. **Parasites & vectors**, v. 17, n. 1, 2024.

SANTARÉM, VAMILTON & SARTOR, IZIDORO. **The free-living phase and seasonal variation of *Boophilus microplus* in Botucatu, São Paulo**. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v. 24, n. 1, p. 11-20, 2003.

SAUERESSIG, T. M.; HONER, M. R. Adjustment of simulations of cattle tick (*Boophilus microplus*) populations and field observations in the Planalto region of Brasília (DF). **Revista Brasileira de Parasitologia Veterinária**, v. 4, p. 9–13, 1995.

SAUERESSIG, T. M.; HONER, M. R. Dinâmica populacional do carrapato *Boophilus microplus* nos cerrados do Distrito Federal, análises e simulações. **Seminário Brasileiro de Parasitologia Veterinária**, v. 8, 1993.

SILVA, E. Carrapato *Boophilus microplus* e impacto na produção animal - Revisão de literatura. *PUBVET - Publicações em Medicina Veterinária e Zootecnia*. **Londrina**, v. 3, n. 22, 2009.

SMITH, R. D. Computer simulation of bovine babesiosis using a spreadsheet age-class model with weekly updates. **Journal of Agricultural Entomology**, v. 8, p. 297–308, 1991.

SMITH, R. D. Epidemiology of babesiosis. Em: **Malaria and Babesiosis**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 207–232.

SMITH, R. D. et al. Babesiosis (*Babesia bovis*) stability in unstable environments. *Annals of the New York Academy of Sciences* 916:510–520. 2000.

SOUZA, A. P et al. FASE DE VIDA LIVRE DO BOOPHILUS MICROPLUS NO PLANALTO CATARINENSE. **'Pesq. agropec. bras.**, Brasilia, 23 (4):427-434. abr. 1988.

STREY, O. F., 3rd et al. Modeling embryo development and emergence of *Boophilus annulatus* (Acari: Ixodidae). **Journal of medical entomology**, v. 28, n. 1, p. 165–173, 1991.

SUNGIRAI, M. et al. Modelling the distribution of *Rhipicephalus microplus* and *R. decoloratus* in Zimbabwe. **Veterinary parasitology (Amsterdam: Online)**, v. 14, p. 41–49, 2018.

SUTHERST, R. A computerised system for matching climates in ecology. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 13, n. 3–4, p. 281–299, 1985a.

SUTHERST, R. W., et al. An analysis of management strategies for cattle tick (*Boophilus microplus*) control in Australia. **Journal of Applied Ecology** 16:359–382. 1979a.

SUTHERST, R. W. et al. Intra-Specific Competition of *Boophilus microplus* (Canestrini) on Cattle. **The journal of applied ecology**, v. 10, n. 3, p. 855, 1973.

SUTHERST, R. W. The dynamics of hybrid zones between tick (Acari) species. **International journal for parasitology**, v. 17, n. 4, p. 921–926, 1987.

SUTHERST, R. W. The role of models in tick control. **Australian veterinary journal**, v. 62, n. S1, p. 32–37, 1985b.

SUTHERST, R. W. Variation in the numbers of the cattle tick, *Boophilus microplus* (Canestrini), in a moist habitat made marginal by low temperatures. **Journal of the Australian Entomological Society**, v. 22, p. 1–5, 1983.

SUTHERST, R. W.; BOTTOMLEY, W. ExperTik: experiences in the evaluation of expert systems for pest management. Em: **Pages 117-122 in Proceedings Simulation Society of Australia/IMACS Eighth Biennial Conference**. [s.l.: s.n.].

SUTHERST, R. W.; BOURNE, A. S. The effect of desiccation and low temperature on the viability of eggs and emerging larvae of the tick, *Rhipicephalus* (*Boophilus*) *microplus* (Canestrini) (Ixodidae). **International journal for parasitology**, v. 36, n. 2, p. 193–200, 2006.

SUTHERST, R. W.; COMINS, H. N. The management of acaricide resistance in the cattle tick, *Boophilus microplus* (Canestrini) (Acari: Ixodidae), in Australia. **Bulletin of entomological research**, v. 69, n. 3, p. 519–537, 1979.

SUTHERST, R. W.; DALLWITZ, M. J. Progress in the development of a population model for the cattle tick *Boophilus microplus*. Em: **Pages 557-563 in 4th International Congress of Acarology. Akademiai. Kiado**. Saalfelden, Austria, 1979.

SUTHERST, R. W.; MAYWALD, G. F.; SUTHERLAND, I. D. The value of host resistance against cattle tick (*Boophilus microplus*) in Australia. Em: **Pages 408-415 in Proceedings of the Second International Symposium on Veterinary Epidemiology and Economics**. Canberra, Australian Capital Territory, Australia: Australian Government Publishing Service, 1980.

SUTHERST, R. W.; WAGLAND, B. M.; ROBERTS, J. A. The effect of density on the survival of *Boophilus microplus* on previously unexposed cattle. **International journal for parasitology**, v. 8, n. 4, p. 321–324, 1978.

TABOR, A. E. et al. Cattle tick *Rhipicephalus microplus*-host interface: A review of resistant and susceptible host responses. **Frontiers in cellular and infection microbiology**, v. 7, 2017.

TAVARES, C. P. et al. Comparative biology between a tropical-equatorial and temperate population of *Rhipicephalus microplus* from Brazil. **Systematic and applied acarology**, 2023.

TEEL, P. D. et al. Simulating biophysical and human factors that affect detection probability of cattle-fever ticks (*Boophilus* spp.) in semi-arid thornshrublands of South Texas. **Ecological modelling**, v. 170, n. 1, p. 29–43, 2003.

TEEL, P. D. et al. Simulation of host-parasite-landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.) population dynamics in rotational grazing systems. **Ecological modelling**, v. 97, n. 1–2, p. 87–97, 1997.

TEEL, P. D.; MARIN, S. L.; GRANT, W. E. Simulation of host-parasite-landscape interactions: influence of season and habitat on cattle fever tick (*Boophilus* sp.) population dynamics. **Ecological modelling**, v. 84, n. 1–3, p. 19–30, 1996.

UTECH, K. B. W. et al. A model of the survival of larvae of the cattle tick, *Boophilus microplus*, on pasture. **Australian journal of agricultural research**, v. 34, n. 1, p. 63, 1983.

VALSONI, L. M. et al. Resistance to all chemical groups of acaricides in a single isolate of *Rhipicephalus microplus* in Mato Grosso do Sul, Brazil. **International journal of acarology**, v. 46, n. 4, p. 276–280, 2020.

VALE, P. et al. The expansion of intensive beef farming to the Brazilian Amazon. **Global environmental change: human and policy dimensions**, v. 57, n. 101922, p. 101922, 2019.

VASCONCELLOS, H. A. S.; CAIADO COUTO, L. Estimation of socioeconomic impacts of wind power projects in Brazil's Northeast region using Interregional Input-Output Analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 149, n. 111376, p. 111376, 2021.

VALSONI, L. M. et al. Status of *Rhipicephalus microplus* resistance to ivermectin, fipronil and fluzuron in Mato Grosso do Sul, Brazil. **Revista brasileira de parasitologia veterinária Brazilian journal of veterinary parasitology**, v. 30, n. 1, p. e025220, 2021.

VERISSIMO, C. J. Fatores que afetam a fase de vida livre de carrapatos. **Rev Educ Contin em Med Vet e Zootec do CRMV-SP**, v. 11, n. 1, p. 14–23, 2013.

VRIGAZOVA, B. The proportion for splitting data into training and test set for the bootstrap in classification problems. **Business Systems Research Journal**, v. 12, n. 1, p. 228–242, 2021.

WANG, H.-H. et al. Simulation of climate-tick-host-landscape interactions: Effects of shifts in the seasonality of host population fluctuations on tick densities. **Journal of vector ecology: journal of the Society for Vector Ecology**, v. 40, n. 2, p. 247–255, 2015.

WANG, H.-H.; GRANT, W. E.; TEEL, P. D. Simulation of climate–host–parasite–landscape interactions: A spatially explicit model for ticks (Acari: Ixodidae). **Ecological modelling**, v. 243, p. 42–62, 2012.

WEIDHAAS, D. E. et al. A basic model for use in computer simulations of *Boophilus* tick biology and control. **USDA Agricultural Research Service**, 1983.

9. ANEXOS

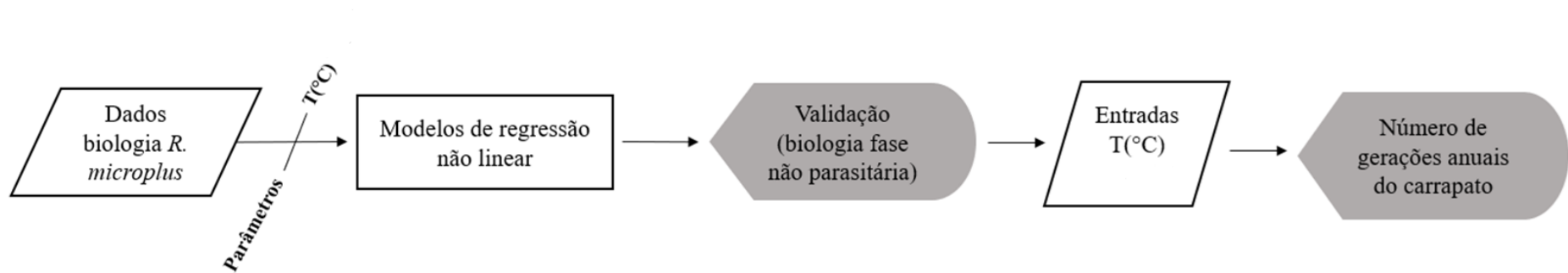


Figura 1A. Flowchart do modelo de previsão do número de gerações anuais do carrapato *R. (B.) microplus*. T (°C) – Temperatura.

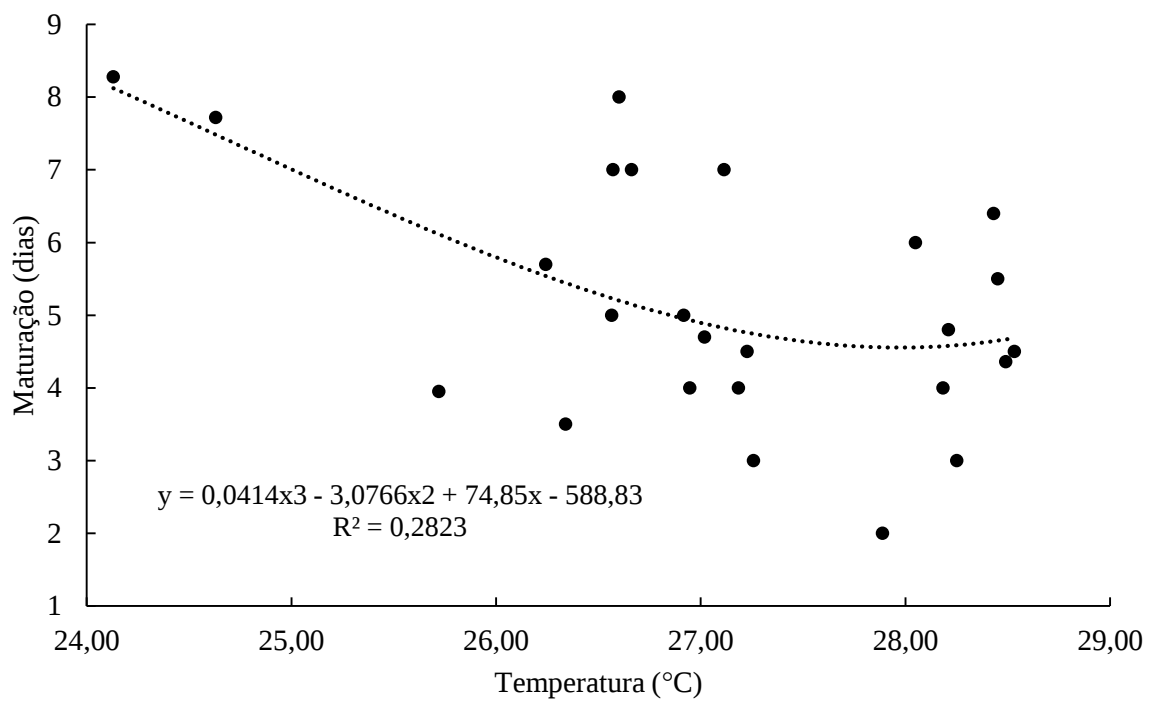
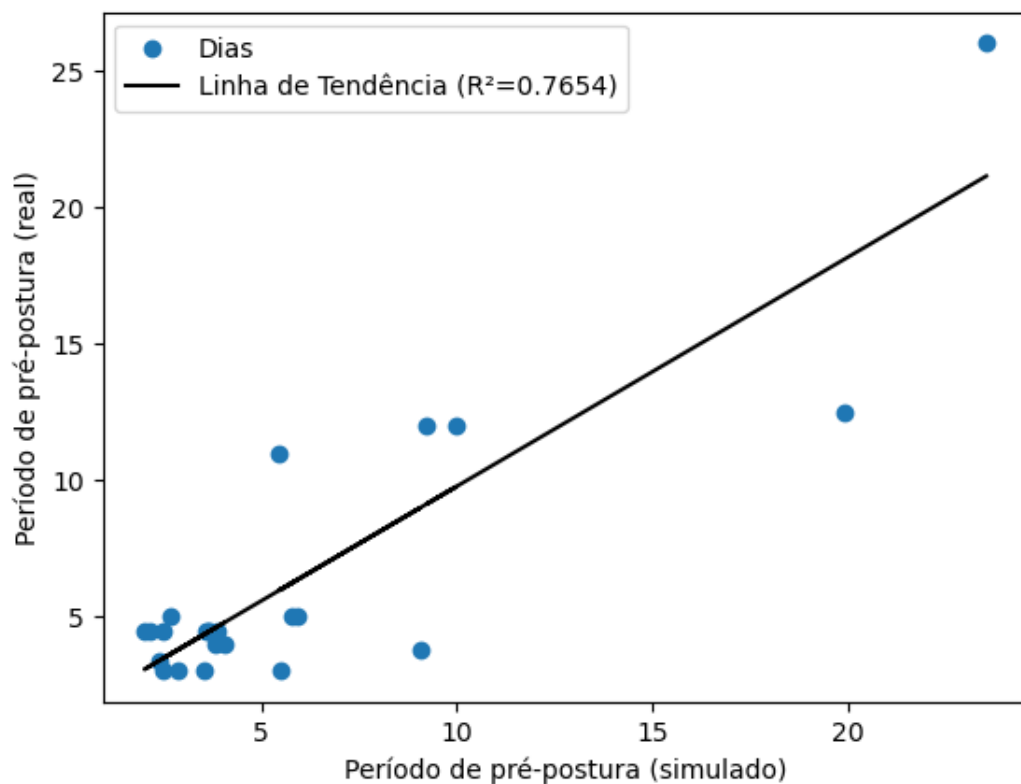


Figura 2A. Análise de correlação por regressão não linear de terceiro grau entre os períodos de maturação larval dos dados da biologia de *R. (B.) microplus* da literatura e temperatura.



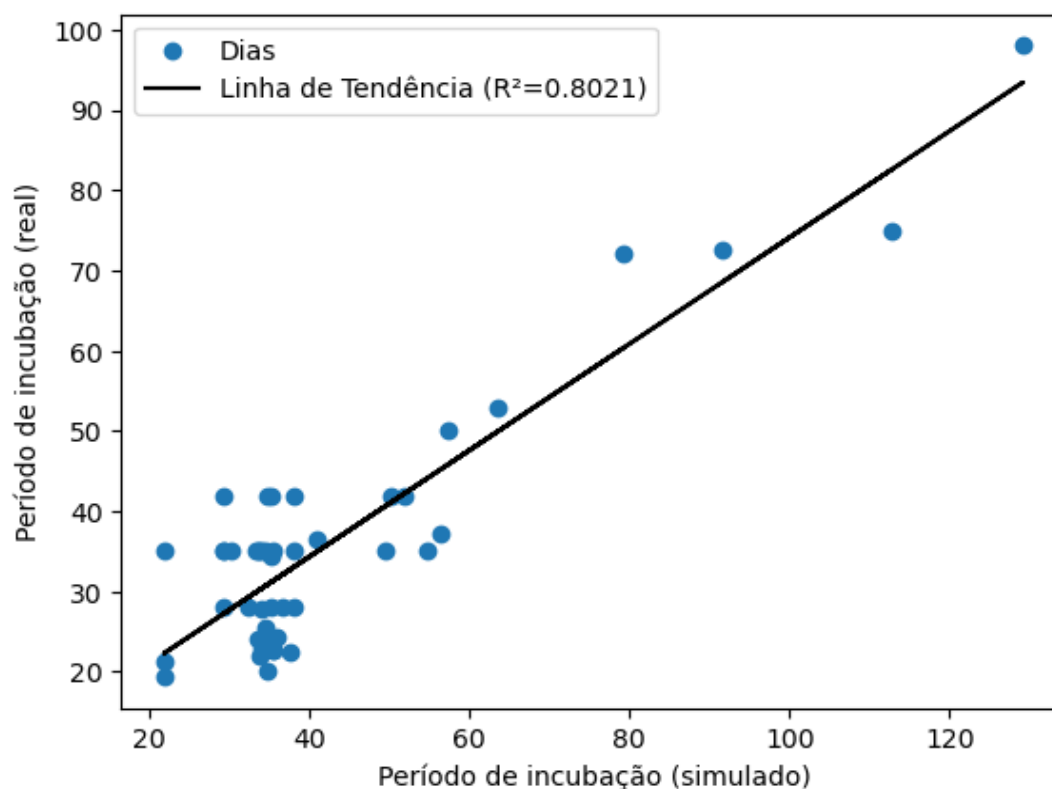


Figura 4A. Linha de tendência entre a previsão do período de incubação simulado por temperatura e dos estudos de validação.

Tabela 1A. Quantidade de dados de cada estudo usados no conjunto treinamento (equação matemática) e validação. MA – São Luís, MA; SP1 - Botucatu, SP; SP2 – Jaboticabal, SP; MG – Coronel Pacheco, MG; SC – Lages, Santa Catarina; PI – Parnaíba, PI e PB – Patos, Paraíba.

Estudo	Código	Pré-postura		Incubação	
		Treinamento	Validação	Treinamento	Validação
Sales et al. (2024)	MA	17	14	6	7
Cruz et al. (2020)	SP2	4	0	8	1
Santarém et al. (2003)	SP1	12	1	1	0
Brovini et al. (2003)	MG	10	0	10	2
Farias et al. (2018)	SC	36	8	21	5
Castro et al. (2021)	PI	4	0	4	5
Barros et al. (2017)	PB	50	0	26	24