



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

**FRANCYEL MATEUS ALVES**

**EFEITOS DO MICRO-HÁBITAT SOBRE A TEMPERATURA CRÍTICA MÁXIMA  
DE FORMIGAS NO GRADIENTE BORDA-NÚCLEO DE UM FRAGMENTO DE  
FLORESTA TROPICAL PLUVIAL**

**AREIA  
2025**

**FRANCYEL MATEUS ALVES**

**EFEITOS DO MICRO-HÁBITAT SOBRE A TEMPERATURA CRÍTICA MÁXIMA  
DE FORMIGAS NO GRADIENTE BORDA-NÚCLEO DE UM FRAGMENTO DE  
FLORESTA TROPICAL PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Ciências Biológicas.

**Orientador:** Prof.(a) Dr.(a) José Domingos Ribeiro Neto.

**AREIA  
2025**

**Catalogação na publicação  
Seção de Catalogação e Classificação**

A474e Alves, Francyel Mateus.  
Efeitos do micro-hábitat sobre a temperatura crítica máxima de formigas no gradiente borda-núcleo de um fragmento de floresta tropical pluvial / Francyel Mateus Alves. - Areia:UFPB/CCA, 2025.  
25 f. : il.

Orientação: José Domingos Ribeiro Neto.  
TCC (Graduação) - UFPB/CCA.

1. Ciências Biológicas. 2. Formigas tropicais. 3. CTmax. 4. Microclima. 5. Fragmentação. 6. Ecologia térmica. I. Ribeiro Neto, José Domingos. II. Título.

UFPB/CCA-AREIA

CDU 573 (02)

FRANCYEL MATEUS ALVES

**EFEITOS DO MICRO-HÁBITAT SOBRE A TEMPERATURA CRÍTICA MÁXIMA  
DE FORMIGAS NO GRADIENTE BORDA-NÚCLEO DE UM FRAGMENTO DE  
FLORESTA TROPICAL PLUVIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
como requisito parcial à obtenção do título de  
Bacharel em Medicina Veterinária pela  
Universidade Federal da Paraíba.

Aprovado em: 29/09/2025.

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 JOSE DOMINGOS RIBEIRO NETO  
Data: 02/10/2025 15:52:35-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. (a) Dr. José Domingos Ribeiro Neto (Orientador)  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente  
 ROSEMBERG FERNANDES DE MENEZES  
Data: 30/09/2025 17:10:44-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. (a) Dr. Rosemberg Fernandes de Menezes  
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

Documento assinado digitalmente  
 XAVIER ARNAN VIADIU  
Data: 30/09/2025 17:05:01-0300  
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. (a) Dr. Xavier Arnan Viadiu  
Universidade do Pernambuco (UPE)

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, ergo minhas preces e reverências aos guias espirituais que me acompanham ao longo desta caminhada. Dijo minhas primeiras palavras de gratidão a Exu Caveira, guardião das encruzilhadas e condutor dos caminhos. Sua força representou a abertura de passagens e a superação de barreiras que, em muitos momentos, pareciam intransponíveis. Sob sua proteção compreendi que cada obstáculo é também um convite ao amadurecimento e que a firmeza espiritual sustenta a continuidade do percurso, mesmo diante de contextos adversos. Reconheço, com profundo respeito, a relevância de sua presença como fundamento essencial em minha caminhada.

À Maria Padilha dedico reverência pela sabedoria e pelo poder transformador que emana de sua guia. Nos seus mistérios encontrei a clareza necessária para preservar a integridade de minha essência, ainda que as circunstâncias apresentassem desafios constantes. Sua presença ensinou-me que a verdadeira força não reside na ausência de dificuldades, mas na capacidade de manter convicções, dignidade e firmeza de propósito diante das adversidades. O aprendizado advindo de seus conselhos permanece como referência para a construção de uma vida sustentada pela autoconfiança e pela consciência de quem se é.

Registro também minha gratidão a Paulo Roberto da Silva, cuja acolhida no axé foi marcada pela serenidade e pela generosidade espiritual. Seus ensinamentos revelaram a importância de cultivar a calma interior e de reconhecer a beleza que subsiste mesmo em meio às exigências da vida. Através de sua orientação compreendi que a suavidade pode coexistir com a firmeza, e que a verdadeira sabedoria se manifesta na constância, no cuidado e na capacidade de renovar o espírito diante das dificuldades. Sua presença constitui, para mim, referência de equilíbrio e de devoção.

Minha reverência se estende à Jurema Sagrada, expressão de cura e de sabedoria, cuja força se fez presente nos momentos em que a dor ameaçava obscurecer a caminhada. Aos seus Mestres, devo reconhecimento e gratidão: ao Malandro do Morro, que inspirou confiança para enfrentar os medos com altivez; Zé do Beco e Zé de Alagoas, que, com simplicidade e firmeza, ensinaram que amadurecer é aceitar a necessidade de escolhas difíceis e aprender com os caminhos percorridos. Cada orientação recebida constituiu guia seguro para que eu prosseguisse com consciência e coragem.

Minha reverência se estende aos orixás, cuja presença e orientação marcaram minha trajetória espiritual e pessoal. A Ogum ofereceu proteção e coragem para enfrentar desafios internos e externos, ensinando a força aliada à disciplina e à determinação. Xangô, como pai e guardião da justiça, guiou-me na compreensão da retidão e da equidade, inspirando decisões pautadas na ética e na responsabilidade. Yansã, com sua energia transformadora, demonstrou como lidar com as turbulências da vida, convertendo ventos de conflito em movimento e aprendizado. Por fim, Iemanjá, mãe das águas salgadas, trouxe renovação e alívio nos momentos de desgaste, revelando que a serenidade e a calma podem emergir mesmo após intensas provações. Cada um desses orixás contribuiu para que eu aprendesse a equilibrar força, justiça, transformação e acolhimento, sustentando minha caminhada com sabedoria e proteção.

Com devoção profunda, agradeço à minha mãe, Maria do Socorro Ferreira, que representa a raiz de minha existência e o alicerce de minha trajetória. Em seu amor encontrei a força silenciosa que sustenta, e em sua coragem reconheci a inspiração que me impulsionou a erguer-me após cada dificuldade. Os seus conselhos atuaram como faróis que iluminaram o caminho, e os seus gestos de cuidado revelaram a dimensão infinita que habita o amor materno. Estendo também minha gratidão à minha família, que de diferentes formas contribuiu para que esta caminhada fosse possível, oferecendo apoio, incentivo e inspiração. Contudo, é em minha mãe que se concentram a solidez de meu caráter e a certeza de nunca ter estado só.

A meu pai, Antônio Fernando Alves da Silva, rendo homenagem por ter despertado, ainda na infância, o encantamento pelo mundo natural. Embora agricultor e homem dedicado à terra, foi também companheiro de descobertas, mestre de curiosidade e exemplo de paciência. Em suas mãos calejadas encontrei lições de ciência e respeito pela vida, transmitidas em momentos simples que se tornaram fundamentos de minha formação. A sua presença constante demonstrou que amizade e amor se manifestam, sobretudo, na disponibilidade de partilhar o cotidiano com ternura.

Ao meu companheiro de vida, Anderson de Jesus dos Santos, registro gratidão pela constância de seu apoio, pela ternura de sua presença e pela paciência com que caminhou ao meu lado nos momentos mais exigentes. Sua dedicação foi abrigo quando necessitei repouso e impulso quando precisei avançar. Em cada conquista alcançada há o reflexo de sua participação, e em cada passo dado permanece a certeza de que esta trajetória foi construída conjuntamente, fortalecida pelo vínculo de um amor que sustenta e transforma.

Com afeto especial, agradeço a Milio, meu gato laranja, cuja presença viva e comunicativa marcou esta jornada. Longe de ser silencioso, Milio expressa-se constantemente, miando em todos os momentos como quem deseja participar de cada detalhe do meu cotidiano. Sua voz, suas demandas e sua energia transformaram os dias de estudo em experiências menos solitárias e mais leves, lembrando-me de que o afeto também se manifesta na companhia ruidosa, nos chamados insistentes e nos gestos inesperados que preenchem a vida de alegria. Ao lado dele, agradeço também a Sofi, sempre cautelosa, mas curiosa e exploradora, que se mantém próxima, procurando carinho de forma contida, com sua aparência de guaxinim e a testa convidativa a carinhos, trazendo delicadeza e leveza ao lar.

Agradeço ao meu orientador, José Domingos Ribeiro Neto, pela orientação dedicada e pelo apoio constante ao longo deste trabalho. Suas sugestões, críticas construtivas e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa e para meu crescimento acadêmico. Sua experiência, rigor científico e generosidade intelectual me guiaram em cada etapa, proporcionando segurança e clareza para enfrentar desafios. Sou grato pela confiança em meu potencial e pelo exemplo que oferece, tornando este trabalho possível.

Por fim, manifesto minha gratidão às instituições que me acolheram e sustentaram esta trajetória: o Laboratório de Ecologia Vegetal e o Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, Campus II – Areia. Esses espaços constituíram o solo fértil em que pude transformar curiosidade em investigação e investigação em conhecimento. Ali encontrei, além da formação científica necessária, desafios que estimularam meu crescimento, e oportunidades que consolidaram a realização deste estudo.

## RESUMO

A fragmentação florestal modifica os limites fisiológicos das espécies ao alterar os gradientes microclimáticos em múltiplas escalas espaciais e temporais. Este estudo investigou a variação da tolerância térmica de formigas tropicais em função do estrato de forrageamento (solo ou vegetação) e da posição na paisagem (borda ou núcleo), considerando os efeitos independentes da estrutura vertical e da configuração espacial da floresta. As coletas foram realizadas na Mata do Pau Ferro, um remanescente de floresta estacional situado no município de Areia, Paraíba, Brasil, onde operárias foram amostradas com armadilhas iscadas com mel em pontos distribuídos entre borda e interior. A tolerância térmica foi determinada experimentalmente, e os dados analisados por ANOVA bifatorial. Verificou-se que formigas arborícolas exibem maior temperatura crítica máxima (CTmax) que aquelas do solo, e que espécies do núcleo são mais tolerantes ao calor do que as da borda, sem interação entre os fatores. Esses resultados revelam a atuação paralela, porém complementar, dos gradientes térmicos verticais e horizontais na seleção de traços fisiológicos. A diferença entre a borda mais quente e a presença de espécies com menor tolerância térmica nesse ambiente sugere que a variabilidade térmica, mais que a temperatura absoluta, atua como filtro ecológico, possivelmente influenciada pela maior proporção de espécies arborícolas no núcleo.

**Palavras-Chave:** formigas tropicais; ctmax; microclima; fragmentação; ecologia térmica.

## ABSTRACT

Forest fragmentation modifies the physiological limits of species by altering microclimatic gradients at multiple spatial and temporal scales. This study investigated the variation in thermal tolerance of tropical ants according to their foraging stratum (ground or vegetation) and landscape position (edge or core), considering the independent effects of vertical structure and spatial configuration of the forest. Collections were carried out in Mata do Pau Ferro, a remnant of seasonal forest located in the municipality of Areia, Paraíba, Brazil, where workers were sampled using honey-baited traps at points distributed between the edge and the interior. Thermal tolerance was determined experimentally, and the data analyzed by two-way ANOVA. It was found that arboreal ants exhibit a higher critical maximum temperature ( $CT_{max}$ ) than those from the ground, and that species from the core are more heat tolerant than those from the edge, with no interaction between the factors. These results reveal the parallel, yet complementary, roles of vertical and horizontal thermal gradients in the selection of physiological traits. The difference between the hotter edge and the presence of species with lower thermal tolerance in that environment suggests that thermal variability, rather than absolute temperature, acts as an ecological filter, possibly influenced by the higher proportion of arboreal species in the core.

**Keywords:** tropical ants;  $ctmax$ ; fragmentation; microclimate; thermal ecology.

## SUMÁRIO

<b>1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>	<b>8</b>
<b>2 CAPÍTULO I – EFEITOS DO MICRO-HÁBITAT SOBRE A TEMPERATURA CRÍTICA MÁXIMA DE FORMIGAS NO GRADIENTE BORDA-NÚCLEO DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA TROPICAL PLUVIAL .....</b>	<b>9</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	9
2.2 METODOLOGIA .....	11
2.2.1 Local de estudo .....	11
2.2.2 Amostragem e coleta de formigas .....	11
2.2.3 Ensaio de tolerância térmica .....	12
2.2.4 Identificação taxonômica .....	13
2.2.5 Análise estatística .....	13
2.3 RESULTADOS .....	13
2.3.1 Composição das amostras coletas .....	13
2.3.2 Limites térmicos máximos (CTmax) por espécie e habitat .....	14
2.3.3 Comparação da CTmax entre hábitos e ambientes .....	15
2.3.4 Comparação da CTmax entre hábitos e ambientes .....	17
2.4 DISCUSSÃO .....	18
2.4.1 Variação da CTmax por estratos verticais e ambientes horizontais .....	18
2.4.2 Efeito dos filtros ambientais .....	18
2.4.3 Interação entre estratificação vertical e horizontal .....	19
2.4.4 Implicações para conservação .....	21
2.5 CONCLUSÃO .....	21
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>22</b>

## 1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A compreensão dos limites fisiológicos dos organismos é essencial para prever como as comunidades responderão às rápidas mudanças ambientais. Em ecossistemas tropicais, a fragmentação florestal e a consequente formação de bordas alteram profundamente o microclima, elevando temperaturas e reduzindo a estabilidade térmica ao longo do dia. Essas mudanças afetam desproporcionalmente organismos ectotérmicos, como as formigas, cujos níveis de atividade, padrões de forrageamento e distribuição de espécies estão intimamente ligados à temperatura (Boyle et al., 2020; Roeder et al., 2022). Nas regiões centrais da floresta, as condições tendem a ser mais amenas e estáveis, funcionando como refúgios térmicos que podem mitigar os efeitos do aquecimento global sobre a biodiversidade (Leahy et al., 2021).

Apesar de avanços recentes, ainda existem lacunas no entendimento sobre como a tolerância térmica máxima varia entre espécies com diferentes hábitos e entre gradientes ambientais, especialmente em comunidades neotropicais. Avaliar essa variabilidade é crucial para identificar quais grupos estão mais vulneráveis ao aquecimento e para compreender se a estrutura vertical e horizontal das florestas atua como barreira ou facilitadora de resiliência térmica.

Este trabalho foi concebido a partir dessa necessidade: investigar a variação da tolerância térmica máxima em formigas coletadas em dois estratos (solo e vegetação) e em dois ambientes contrastantes (borda e núcleo florestal), a fim de detectar padrões de tolerância térmica e discutir suas implicações ecológicas. O estudo busca contribuir para o avanço do conhecimento sobre a ecologia térmica de formigas, oferecendo subsídios para estratégias de conservação e manejo em paisagens fragmentadas.

## **2 CAPÍTULO I – EFEITOS DO MICRO-HÁBITAT SOBRE A TEMPERATURA CRÍTICA MÁXIMA DE FORMIGAS NO GRADIENTE BORDA-NÚCLEO DE UM FRAGMENTO DE FLORESTA TROPICAL PLUVIAL**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

As mudanças climáticas globais comprometem a estabilidade térmica dos ecossistemas, com impactos particularmente severos nas regiões tropicais, onde pequenas variações de temperatura podem causar mudanças significativas no funcionamento dos ecossistemas (Sunday et al., 2014; Kaspari et al., 2015). A baixa amplitude térmica histórica dos trópicos favoreceu a evolução de espécies altamente especializadas, com tolerância restrita a variações na temperatura ambiental. Em contraste, organismos de latitudes temperadas enfrentam sazonalmente flutuações térmicas mais amplas do que aquelas previstas para os cenários futuros de aquecimento, o que favoreceu o desenvolvimento de largas amplitudes de tolerância fisiológica à variação da temperatura (Deutsch et al., 2008). Projeções indicam aumento persistente da temperatura média global e maior frequência de eventos extremos, como ondas de calor, ameaçando a integridade funcional de comunidades de organismos ectotérmicos ao redor do mundo, ampliando taxas de mortalidade, como observado em espécies arborícolas sensíveis à seca (IPCC, 2023; Anderegg et al., 2015). Adicionalmente, as mudanças climáticas globais podem ter seus efeitos sobre a biodiversidade modulados por fatores locais, como os efeitos de borda (Newbold et al., 2019).

Os efeitos de borda são mudanças nas condições ambientais que ocorrem nas zonas periféricas dos fragmentos florestais decorrentes do contato com ambiente não florestado tais como maior incidência de luz solar, temperaturas elevadas e menor umidade em relação aos núcleos florestais (Laurance et al., 2002; Ewers; Banks-leite, 2013). As condições alteradas das bordas florestais influenciam as comunidades biológicas, impondo perda de biodiversidade (Newbold et al., 2019), em particular de grupos de espécies menos tolerantes às condições ambientais impostas pelos efeitos de borda, ao passo que promovem a hiper-proliferação de espécies bem adaptadas às novas condições (Newbold et al., 2019), levando as comunidades biológicas à homogeneização biótica (Newbold et al., 2019). Por exemplo, a maior temperatura observada nas bordas florestais pode favorecer espécies (ou indivíduos) mais bem adaptadas ao calor em comparação a espécies (ou indivíduos) que colonizam o interior dos fragmentos florestais, ainda que isso possa ser modulado por outras características da história de vida dos

organismos, como especializações a micro-hábitats (Barahona-segovia et al., 2019; Costa et al., 2020).

A resposta da fauna de formigas tropicais aos efeitos de borda tem sido amplamente investigada, e a literatura reporta perda de espécies e homogeneização biótica (Newbold et al., 2019). As formigas cortadeiras são um dos principais grupos positivamente afetados (Newbold et al., 2019), enquanto formigas mais especializadas tendem a ser negativamente afetadas (González et al., 2018; Ribeiro-neto et al., 2016). No entanto, a tolerância térmica da fauna de formigas tem sido menos avaliada em relação aos efeitos de borda (ROEDER et al., 2021), embora o aumento de perturbações antrópicas em geral esteja relacionado ao favorecimento de espécies de formigas termofílicas (Roeder et al., 2021; Bujan et al., 2020). Como formigas são organismos ectotérmicos, apresentam limites térmicos superiores (CTmax) que variam conforme o estrato e a exposição ao ambiente (Kaspari et al., 2015; Leahy et al., 2021). Espécies arborícolas, geralmente de menor tamanho e mais generalistas, tendem a suportar temperaturas mais elevadas, pois estão mais expostas a temperaturas maiores e mais variáveis devido à radiação solar, e seus ninhos, construídos na vegetação, não oferecem refúgios térmicos eficientes. Já as espécies que vivem no solo, que são menos generalistas, apresentam menor tolerância térmica máxima (Bujan et al., 2020; Roeder et al., 2021), pois os ninhos no solo ficam expostos a temperaturas inferiores e mais estáveis, o que proporciona refúgios térmicos eficientes contra temperaturas extremas. Assim, compreender se ambientes florestais afetados por borda concentram espécies mais termotolerantes do que núcleos florestais, que apresentam maior estabilidade microclimática e térmica devido à cobertura densa e micro-hábitats protegidos (Roeder et al., 2021), é importante, pois formigas apresentam elevada diversidade, ampla ocupação de micro-hábitats e desempenham funções ecológicas relevantes como predação, dispersão de sementes e ciclagem de nutrientes (Parr; Bishop, 2022).

Testou-se a hipótese de que o CTmax das espécies é determinado pela exposição térmica dos ambientes em que ocorrem, sendo maior em ambientes com maior incidência de luz solar e maior variabilidade térmica — como bordas florestais e micro-hábitats arbóreos — e menor em ambientes com menor incidência luminosa e maior estabilidade térmica — como o núcleo florestal e micro-hábitats associados ao solo. Assim, espera-se que formigas arborícolas e aquelas registradas na borda da floresta apresentem valores mais elevados de CTmax, enquanto espécies associadas ao solo e a áreas internas tendam a exibir CTmax mais baixos, em consonância com estratégias relacionadas à conservação de água e à baixa exposição à radiação direta. Adicionalmente, prevê-se que a magnitude do contraste térmico entre micro-hábitats (arborícola vs. solo) varie conforme o habitat: no núcleo, a maior densidade de vegetação deve

acentuar as diferenças térmicas entre micro-hábitats, enquanto na borda, a exposição generalizada tende a reduzir esse contraste. Dessa forma, a interação entre habitat e micro-hábitat pode gerar padrões distintos de CTmax, reforçando a importância de considerar ambos os níveis na análise. A verificação dessas previsões contribui para compreender como diferentes componentes das comunidades de formigas respondem aos gradientes microclimáticos, especialmente em paisagens fragmentadas sujeitas à intensificação dos extremos térmicos.

## 2.2 METODOLOGIA

### 2.2.1 Local de estudo

O estudo foi conduzido no Parque Estadual da Mata do Pau Ferro, localizado no município de Areia, Paraíba ( $06^{\circ}58'12"S$ ,  $35^{\circ}42'15"W$ ). Essa área consiste em um fragmento florestal de 600 hectares e representa um ecótono de elevada complexidade ecológica, onde ocorre a transição entre a Mata Atlântica e a Caatinga. Essa transição gera gradientes ambientais que influenciam diretamente a distribuição e a fisiologia das espécies (Silva & Tabarelli, 2000). O clima da região apresenta temperatura média anual de aproximadamente  $22^{\circ}C$  e precipitação anual em torno de 1500 mm (Pôrto et al., 2004). A fauna de formigas da área de estudo é composta por, pelo menos, 29 gêneros e 49 espécies/morfoespécies, com a subfamília Myrmicinae apresentando a maior riqueza de espécies (19) e Dolichoderinae apresentando apenas uma espécie (Santos et al., 2019). Embora não haja avaliação dos efeitos de borda sobre a mirmecofauna da área de estudo, a literatura descreve efeitos de fatores locais sobre a estrutura das comunidades de formigas, como a altura do dossel, sazonalidade, e a ocorrência de clareiras decorrentes da presença de palmeiras (Dantas; Dantas; Ribeiro-neto, 2022; Dantas et al., 2024).

### 2.2.2 Amostragem e coleta de formigas

Para a coleta das formigas, foram estabelecidos dez pontos amostrais, cinco localizados na borda da floresta e cinco no núcleo. Os pontos de borda foram distribuídos em uma faixa entre 10 m e 110 m a partir da fronteira entre a floresta e a rodovia PB-079, enquanto os pontos no núcleo florestal foram estabelecidos em uma faixa entre 400 m e 500 m de distância de qualquer borda. A localização exata de cada ponto foi registrada com GPS e avaliada posteriormente por meio de um sistema de informações georreferenciadas para confirmação das distâncias para os limites do fragmento.

Em cada ponto de amostragem, foram instaladas duas iscas, uma no micro-hábitat arborícola (vegetação) e outra no micro-hábitat solo, totalizando 20 iscas. Cada isca consistia em um guardanapo embebido com uma colher de sopa de xarope de glicose, substância altamente atrativa para formigas devido ao seu elevado teor de carboidratos. As iscas foram posicionadas próximo à base de árvores, no solo, e em galhos a 1,5–2 m de altura na vegetação. Entendemos que o consumo de carboidratos pode elevar a CTmax de algumas espécies de formigas em particular (Bujan & Kaspari, 2017; Freires et al., 2023), mas não há evidências de que essas formigas estejam especialmente restritas a um único micro-hábitat (solo ou vegetação) nem especialmente restritas a um único ambiente (borda ou núcleo florestal).

As coletas foram realizadas entre 7h e 11h, sob condições meteorológicas semelhantes, com temperatura entre 25 e 30 °C e ausência de chuva, de modo a não interferir na atividade natural das formigas. As iscas ficaram ativas por 60 minutos — tempo suficiente para permitir o recrutamento de operárias de diversas espécies. Algumas espécies têm a capacidade de monopolizar recursos (iscas), porém não observamos isso nas iscas e o número de espécies e a composição de espécies são similares considerando os micro-hábitats (solo e vegetação) e ambientes (borda e núcleo florestal) avaliados. Após esse período, os indivíduos foram coletados com pinças entomológicas finas e transferidos diretamente para microtubos tipo Eppendorf, devidamente rotulados com micro-hábitat, ambiente e data. Após a coleta, os indivíduos de formigas foram transportados para o laboratório em condições controladas (caixa térmica), garantindo a preservação de sua integridade fisiológica (Baudier et al., 2015; Nascimento et al., 2024).

### **2.2.3 Ensaio de tolerância térmica**

Para a análise da tolerância térmica máxima (CTmax), dentro de um intervalo de tempo de 2 horas, os indivíduos já acondicionados em tubos de Eppendorf de 1,5 mL foram submetidos a um protocolo de incremento térmico progressivo, adaptado de Lutterschmidt e Hutchison (1997) e validado por testes-piloto. Protocolos similares, que utilizam rampas de aquecimento controladas em banhos térmicos ou dry baths, são amplamente empregados para determinar a CTmax em formigas, garantindo medidas confiáveis e comparáveis entre espécies (Leong et al., 2022; Nascimento et al., 2024; Baudier et al., 2015; Kaspari et al., 2015; Leahy et al., 2021). Os testes preliminares definiram que a temperatura inicial do banho-maria seria 38°C, ponto a partir do qual as formigas começavam a exibir sinais de estresse térmico, em

concordância com estudos que identificam o início do estresse térmico em temperaturas próximas para diferentes espécies de formigas (Kaspari et al., 2015; Nascimento et al., 2024).

#### **2.2.4 Identificação taxonômica**

Após realizados os bioensaios de tolerância térmica máxima, identificação taxonômica foi realizada com base no Guia Para os Gêneros de Formigas do Brasil (Baccaro et al., 2015), permitindo a categorização das espécies ou morfoespécies.

#### **2.2.5 Análise estatística**

O protocolo consistiu em elevar a temperatura em 2°C a cada 10 minutos, utilizando um termostato digital de precisão ( $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ). Durante o experimento, as formigas foram monitoradas continuamente para registro da temperatura na qual se detectou a ocorrência de falha locomotora irreversível (CTmax), definida como a incapacidade de retomar a locomoção após estimulação mecânica suave com um pincel, critério amplamente utilizado em estudos de tolerância térmica em formigas (Leong et al., 2022; Nascimento et al., 2024; Baudier et al., 2015; Leahy et al., 2021).

Na etapa de análise estatística, foi realizada uma análise de variância fatorial (ANOVA fatorial) para testar os efeitos do micro-hábitat (vegetação vs. solo) e do ambiente (borda vs. núcleo) sobre os valores médios de CTmax das espécies de formigas, considerando a média dos diferentes indivíduos por espécie como réplica. A análise incluiu a interação entre os dois fatores para investigar possíveis efeitos combinados na tolerância térmica, embora não tenha sido explicitamente prevista nas hipóteses iniciais. A análise seguiu os procedimentos descritos por Zar (1999) e foi conduzida no software R (R Core Team, 2024).

### **2.3 RESULTADOS**

#### **2.3.1 Composição das amostras coletas**

A amostragem total resultou em 211 indivíduos de formigas, distribuídos em 39 espécies, sendo 129 indivíduos (de 30 espécies) registrados na borda da floresta e 82 indivíduos (de 22 espécies) no interior da floresta. Em relação ao estrato de forrageamento, 121 indivíduos foram coletados no solo e 90 em armadilhas arborícolas.

### 2.3.2 Limites térmicos máximos (CTmax) por espécie e habitat

Todos os indivíduos coletados foram distribuídos entre seis subfamílias, sendo Myrmicinae a mais abundante e diversificada, somando 101 indivíduos e 20 espécies (ver Tabela 1). Entre seus gêneros mais representativos destacaram-se *Pheidole* (25 indivíduos, 2 espécies: Complexo *Pheidole aberrans* e Complexo *Pheidole tristis*), *Crematogaster* (22 indivíduos, 4 espécies), *Cephalotes* (14 indivíduos, 4 espécies) e *Wasmannia auropunctata* (14 indivíduos).

Tabela 1 - Valores máximos de tolerância térmica crítica superior (CTmax, °C) de formigas, por espécie, subfamília, hábito (solo vs. arborícola) e ambiente (borda vs. núcleo florestal). Os valores representam o maior CTmax registrado para cada espécie em cada combinação de hábito e ambiente, com o número de indivíduos testados indicado.

SUBFAMÍLIA <i>Espécie</i>	Indivíduos testados	Limite térmico máximo (CTmax - °C)			
		Borda florestal	Núcleo florestal	Solo	Arborícolas
<b>DOLICHODERINAE</b>					
<i>Azteca</i> sp.	12	44	48	–	44
<i>Dolichoderus bispinosus</i>	3	–	48	–	48
<i>Dolichoderus lutosus</i>	1	42	–	42	–
<i>Tapinoma melanocephalum</i>	4	48	–	48	38
<b>DORYLINAЕ</b>					
<i>Eciton burchellii</i>	1	46	–	–	46
<b>ECTATOMMINAE</b>					
<i>Ectatomma brunneum</i>	9	50	46	42	50
<i>Ectatomma muticum</i>	6	–	48	–	48
<b>ECTATOMMINAE</b>					
<i>Ectatomma</i> sp3.	1	–	48	48	–
<i>Gnamptogenys</i> sp1.	2	–	48	48	–
<i>Holcoponera</i> sp.	12	46	–	46	–
<b>FORMICINAE</b>					
<i>Acropyga</i> sp.	2	40	40	–	–
<i>Camponotus arboreus</i>	3	48	–	–	48
<i>Camponotus rectangularis</i>	1	46	–	–	46
<i>Camponotus sexguttatus</i>	9	48	46	48	40
<i>Camponotus</i> sp2.	2	–	48	48	–
<i>Paratrechina longicornis</i>	21	–	50	50	48
<b>MYRMICINAE</b>					
<i>Apterostigma</i> sp.	2	–	46	46	–
<i>Cephalotes clypeatus</i>	1	48	–	–	48
<i>Cephalotes pusillus</i>	10	–	52	–	52
<i>Cephalotes</i> sp3.	1	–	46	–	46
<i>Cephalotes umbraculatus</i>	2	50	–	–	50

<i>Crematogaster</i> sp.	5	42	—	42	—
<i>Crematogaster</i> sp1.	5	46	—	42	46
<i>Crematogaster</i> sp2.	8	46	—	38	46
<i>Crematogaster</i> sp3.	4	—	52	—	52
<i>Monomorium pharaonis</i>	4	42	—	42	—
<b>MYRMICINAE</b>					
Complexo <i>Pheidole aberrans</i>	9	44	50	50	44
Complexo <i>Pheidole tristis</i>	16	44	48	42	48
Complexo <i>Solenopsis globularia</i>	2	—	48	48	—
<i>Solenopsis geminata</i>	5	50	—	40	50
<i>Solenopsis globularia</i>	5	44	—	44	—
<i>Solenopsis</i> sp3.	3	—	50	50	—
<b>SUBFAMÍLIA</b>		Indivíduos testados	Limite térmico máximo (CTmax - °C)		
<i>Espécie</i>			Borda florestal	Núcleo florestal	Solo Arborícolas
<b>MYRMICINAE</b>					
<i>Tetramorium simillimum</i>	3	44	—	44	44
<i>Trichomyrmex</i> sp1.	2	—	50	—	50
<i>Wasmannia auropunctata</i>	14	44	42	42	44
<b>PONERINAE</b>					
<i>Dinoponera quadriceps</i>	8	40	38	40	—
<b>PSEUDOMYRMECINAE</b>					
Complexo <i>Pseudomyrmex gracilis</i>	3	46	48	—	48
<i>Pseudomyrmex</i> sp2.	1	40	—	—	40
<i>Pseudomyrmex</i> sp3.	2	46	48	—	48
<i>Pseudomyrmex termitarius</i>	7	48	—	—	48

### 2.3.3 Comparação da CTmax entre hábitos e ambientes

O menor valor de CTmax registrado para espécies na subfamília Myrmicinae, a mais representativa neste estudo, foi de 38 °C, observado em *Crematogaster* sp2, uma espécie arborícola da borda. O maior valor foi de 52 °C, registrado em indivíduos de *Crematogaster* sp3 e *Cephalotes pusillus*, ambos arbóreos do núcleo. Algumas espécies ocorreram exclusivamente em um tipo de ambiente: *Crematogaster* sp3, *Cephalotes pusillus* e *Trichomyrmex* sp1 foram restritas ao núcleo, enquanto *Solenopsis globularia* e *Monomorium pharaonis* foram registradas apenas na borda. Quanto ao estrato, *Apterostigma* sp. e *Solenopsis globularia* ocorreram apenas no solo, enquanto todas as espécies de *Cephalotes* e foram exclusivamente arborícolas (Figuras 1 e Figura 2).

As subfamílias Pseudomyrmecinae, Ectatomminae e Ponerinae apresentaram menor representatividade. Pseudomyrmecinae somou 13 indivíduos distribuídos em quatro espécies do gênero *Pseudomyrmex*, todos com hábito arborícola. A menor CTmax foi de 40 °C,

registrada em *Pseudomyrmex* sp2 (borda), e a máxima de 48 °C, em *P. termitarius* (borda) e *P. gracilis* (núcleo). Ectatomminae teve 16 indivíduos, sendo a maioria *Ectatommma brunneum*, com CTmax de até 50 °C em indivíduos arbóreos da borda, enquanto a mínima foi de 42 °C em *E. brunneum* de solo da borda. Já Ponerinae foi representada exclusivamente por *Dinoponera quadriceps* (8 indivíduos), restrita ao solo, com CTmax entre 38 °C (núcleo) e 40 °C (borda).

Entre as espécies dessas subfamílias, *Pseudomyrmex termitarius* foi restrita à borda, e *Ectatommma muticum* e *Ectatommma* sp3 foram encontradas apenas no núcleo, refletindo preferências microambientais distintas (ver Figuras 1 e 2).

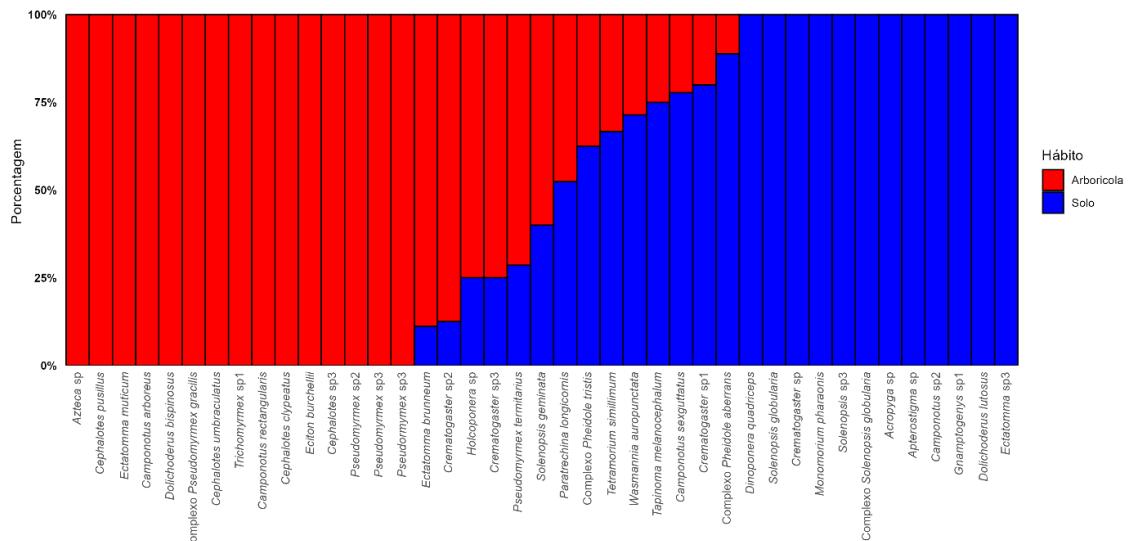


Figura 1- Porcentagem de ocorrência das espécies de formigas em relação ao hábito: solo (vermelho) e arborícola (azul). Para cada espécie, as barras representam a distribuição percentual das ocorrências registradas exclusivamente em solo ou em ambientes arborícolas, indicando a preferência ou especialização de uso do micro-hábitat.

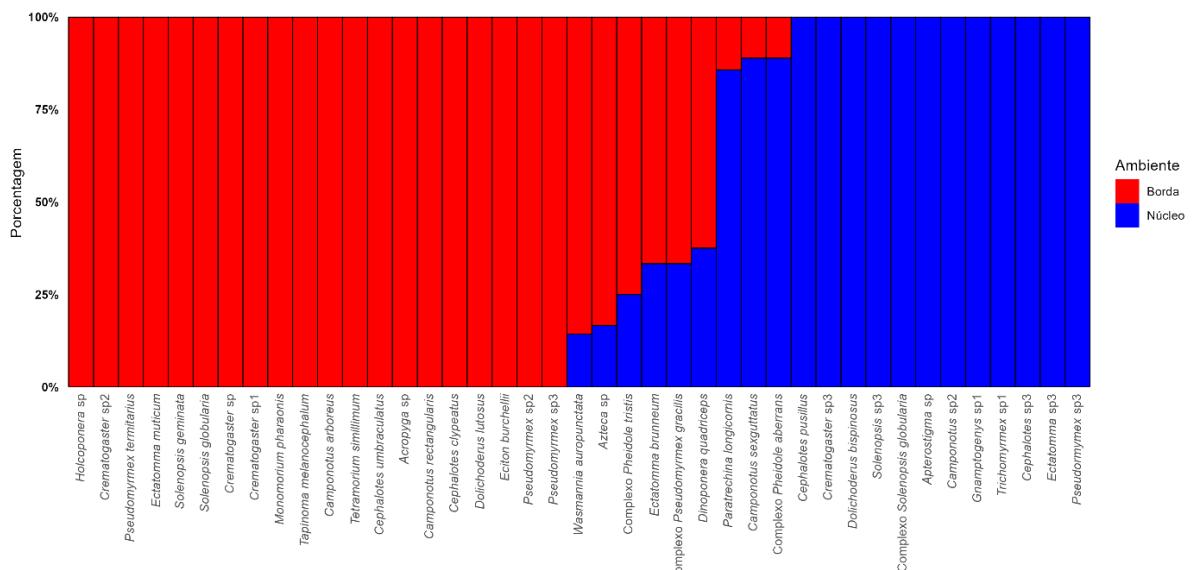


Figura 2- Porcentagem relativa de ocorrência das espécies de formigas nos ambientes de núcleo e borda florestal, representados pelas cores vermelho e azul, respectivamente. Os dados indicam a distribuição espacial das espécies nos diferentes micro-hábitats.

### 2.3.4 Comparação da CTmax entre hábitos e ambientes

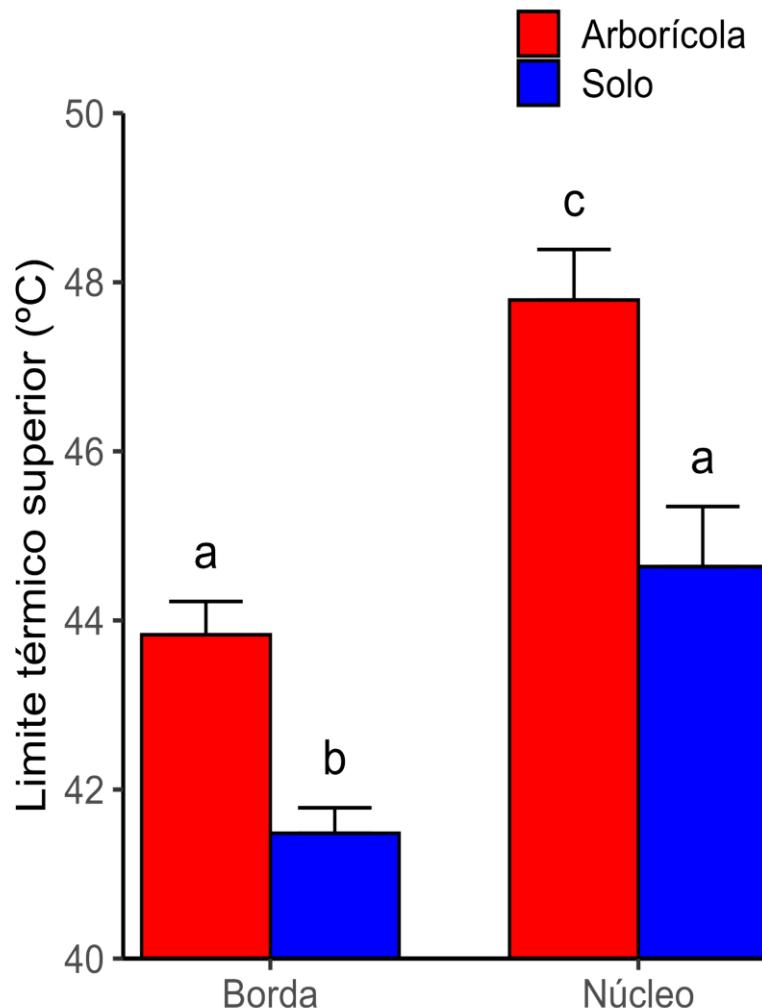


Figura 1 Média ( $\pm$  erro padrão) do limite térmico superior (CTmax) das formigas segundo o hábito (arborícola e de solo) e o ambiente (borda e núcleo da floresta). Letras distintas sobre as barras indicam diferenças estatisticamente significativas entre os grupos (ANOVA bifatorial seguida de teste post-hoc de Tukey,  $p < 0,05$ ).

A média de temperatura crítica máxima (CTmax) diferiu significativamente entre os os mciro-hábitats e no gradiente borda-núcleo (Figura 3). Formigas arborícolas apresentaram CTMáx em média 6% mais elevados que as de solo ( $F_{1,207} = 4,97$ ;  $p = 0,04$ ). Quanto ao ambiente, os indivíduos no núcleo toleraram temperaturas, em média, 8% maiores se comparados aos indivíduos na borda ( $F_{1,207} = 11,76$ ;  $p = 0,003$ ). As maiores médias foram observadas entre arborícolas do núcleo ( $47,79^{\circ}\text{C} \pm 3,68$ ) e as menores entre indivíduos de solo da borda ( $41,48^{\circ}\text{C} \pm 2,30$ ). As diferenças entre borda e núcleo foram consistentes dentro de cada hábito, e não houve interação significativa entre os fatores ( $F_{1,207} = 0,003$ ;  $p = 0,96$ ) (Tabela 2).

Tabela 2 Estatísticas descritivas do CTmax (°C) das formigas, segundo o micro-hábitat (vegetação vs. solo) e o ambiente (borda vs. núcleo).

Hábito	Ambiente	CTmax Média (°C)	DP	CTmax Mínima (°C)	CTmax Máxima (°C)
Arborícola	Borda	43,83	3,31	38	50
Arborícola	Nucleo	47,79	3,68	38	52
Solo	Borda	41,48	2,30	38	48
Solo	Nucleo	44,64	4,72	38	52

## 2.4 DISCUSSÃO

### 2.4.1 Variação da CTmax por estratos verticais e ambientes horizontais

A tolerância térmica máxima das formigas variou significativamente em função de dois eixos ecológicos centrais: o hábito de forrageamento (solo vs. arborícola) e o ambiente (borda vs. núcleo). O padrão geral observado é que as formigas arborícolas do núcleo florestal resistiram a temperaturas mais elevadas, resultado da combinação entre a maior incidência de radiação solar e a variabilidade microclimática características do dossel (Leahy et al., 2021; Stark et al., 2017). Em contrapartida, as menores tolerâncias foram registradas entre as espécies de solo nas bordas, a despeito de essas áreas apresentarem temperaturas médias mais altas do que o núcleo do fragmento. Nesses ambientes, a utilização de microrefúgios sombreados do solo favorece a persistência de espécies com menor capacidade de suportar calor extremo, limitando sua exposição direta a temperaturas críticas (Andersen, 2018; Kumar & O'Donnell, 2009). Dessa forma, a comunidade de borda tende a ser composta por espécies com diferentes estratégias ecológicas em relação ao núcleo, que funciona como refúgio para espécies com maior amplitude térmica.

### 2.4.2 Efeito dos filtros ambientais

A distribuição dos valores de CTmax em formigas ao longo de eixos ecológicos vertical (solo versus vegetação) e horizontal (borda versus núcleo) reflete a ação combinada de filtros ambientais distintos, que vão além da temperatura e incluem fatores como cobertura vegetal, aridez, fragmentação do ambiente e uso do solo, sendo capazes de moldar a fisiologia das espécies e selecionar aquelas mais tolerantes aos diferentes parâmetros ambientais e com

diferentes rotinas de atividade circadiana (Andersen, 2018; Leahy et al., 2021; Andrew et al., 2019; Boet; Arnan; Retana, 2020; Baudier et al., 2015; Kumar; O'donnell, 2008; Mata-guel et al., 2023; Youngsteadt et al., 2023). Além disso, a intensidade do uso do solo e a aridez podem reduzir a resiliência fisiológica das espécies, diminuindo seus limites térmicos superiores (Andrew et al., 2019). A filtragem ambiental, portanto, atua em múltiplas escalas espaciais e ecológicas, promovendo uma segregação funcional baseada em traços fisiológicos, como a tolerância térmica, e em estratégias comportamentais, como a regulação da atividade diária para evitar exposições a temperaturas extremas (Youngsteadt et al., 2023; Andersen, 2018; Mata-guel et al., 2023; Penick et al., 2017).

#### **2.4.3 Interação entre estratificação vertical e horizontal**

As espécies arborícolas apresentaram valores mais elevados de CTmax em comparação às edáficas, alinhando-se a evidências que indicam o dossel como um ambiente de maior amplitude térmica, menor amortecimento microclimático e maior exposição à radiação solar (Stark et al., 2017; Leahy et al., 2021; Kaspari et al., 2015). Essas condições impõem pressões seletivas que favorecem espécies com limites fisiológicos térmicos mais elevados (Leahy et al., 2021; Kaspari et al., 2015). A estratificação vertical da vegetação também estrutura as comunidades de formigas, não só pela hierarquia competitiva, mas por diferenças funcionais e fisiológicas entre os estratos, evidenciadas em padrões distintos de composição, riqueza funcional e redundância entre formigas arborícolas e edáficas (Almeida et al., 2022; Mottl et al., 2020; Law, 2019). Assim, a exposição a microclimas mais extremos no dossel seleciona espécies com maior tolerância ao calor, enquanto as formigas edáficas, protegidas pelo solo, mantêm limites térmicos inferiores. Essa estratificação molda não apenas a composição comunitária, mas também as adaptações fisiológicas das espécies, com implicações relevantes para a resposta das formigas às mudanças climáticas. Embora as formigas arborícolas apresentem CTmax significativamente maiores e maior amplitude térmica, populações dessas em áreas mais quentes podem estar próximas de seus limites fisiológicos, tornando-se potencialmente mais vulneráveis ao aquecimento global.

No gradiente horizontal, o núcleo florestal concentrou espécies com limites térmicos mais altos do que a borda (tanto no solo quanto na vegetação), contrapondo-se a expectativas frequentemente relatadas na literatura, que sugerem que ambientes mais expostos, como as bordas, tenderiam a selecionar espécies fisiologicamente mais tolerantes ao calor (Câmara et al., 2024; Nascimento et al., 2022). Em vez disso, os dados indicam que as assembleias do

interior abrigam espécies com maior CTmax, o que pode estar relacionado à maior diversidade funcional e variação na composição de espécies dessas áreas, incluindo formas adaptadas a temperaturas extremas ou a atividades que envolvem maior exposição a picos térmicos. Em fragmentos florestais como a Mata do Pau Ferro, a estrutura vertical e a complexidade do dossel no interior promovem sombreamento e amortecimento das variações térmicas, tornando o núcleo florestal, em geral, mais frio e estável do que as bordas. Estudos mostram que tanto em florestas temperadas quanto tropicais, as temperaturas máximas e a amplitude térmica diária são significativamente menores no interior, devido à maior cobertura vegetal e ao efeito de buffering proporcionado pelo dossel (Meeussen et al., 2021; Zellweger et al., 2019; Ismaeel et al., 2024; Arroyo-rodríguez et al., 2016). Assim, a presença de espécies com maior tolerância térmica no núcleo não se explica por picos térmicos mais elevados, mas sim pela heterogeneidade de microambientes e pela diversidade de nichos proporcionados pela estrutura interna da floresta, que favorecem uma maior diversidade funcional.

Filtros ambientais mais intensos tendem a restringir a variação funcional das comunidades, favorecendo apenas organismos com traços compatíveis com as condições locais (Boet; Arnan; Retana, 2020; Braun; Lortie, 2024; Wiescher; Pearce-duvet; Feener, 2012). A literatura mostra que as bordas das florestas apresentam temperaturas mais elevadas do que o interior, funcionando como filtros ambientais mais severos (Kaspari et al., 2015; Baudier et al., 2015). Neste estudo, comunidades de formigas nas bordas exibiram menor desvio-padrão nos valores de CTmax em comparação ao núcleo, sugerindo que as espécies presentes nas bordas compartilham perfis fisiológicos semelhantes, o que indica que o filtro ambiental não necessariamente eleva a tolerância máxima, mas pode também reduzir a amplitude de tolerâncias térmicas viáveis (Boet; Arnan; Retana, 2020; Braun; Lortie, 2024). Em contraste, o núcleo florestal, que apresenta temperaturas mais baixas e maior estabilidade térmica (Kaspari et al., 2015; Leahy et al., 2021), abrigou espécies mais tolerantes a temperaturas altas e maior variação do CTmax, implicando coexistência de formas fisiologicamente distintas — desde espécies sensíveis até altamente resistentes ao calor. Essa heterogeneidade está associada à presença de microclimas diversos e mais estáveis, promovidos pela estrutura vertical da floresta, o que reduz a intensidade do filtro ambiental e permite a coexistência de espécies com estratégias funcionais contrastantes, inclusive diferentes limites de tolerância térmica (Le Bagousse-pinguet et al., 2017; Sutton et al., 2021). Ambientes menos perturbados, como sugerem Boyle et al. (2020), favorecem a manutenção de maior diversidade funcional e múltiplas estratégias térmicas. Assim, o padrão observado depende não apenas da severidade

térmica média, mas da complexidade e seletividade das condições ambientais em cada ambiente (Boet; Arnan; Retana, 2020; Braun; Lortie, 2024; Leahy et al., 2021).

#### **2.4.4 Implicações para conservação**

À luz das mudanças climáticas em curso, a presença de espécies com maior tolerância a altas temperaturas no núcleo florestal tem implicações importantes. A fragmentação e a degradação da vegetação nativa reduzem a disponibilidade desses microambientes internos, potencialmente comprometendo a manutenção de grupos funcionais que conferem resiliência térmica aos ecossistemas tropicais. A substituição de espécies fisiologicamente especializadas por formas mais generalistas e termicamente limitadas pode desencadear perdas funcionais e afetar processos ecológicos fundamentais (Penick et al., 2017; Addo-bediako et al., 2000). Estratégias de conservação devem, portanto, priorizar não apenas a manutenção da cobertura florestal, mas também a integridade estrutural que garante a presença de ambientes internos termicamente exigentes.

### **2.5 CONCLUSÃO**

Os padrões de tolerância térmica observados entre as comunidades de formigas da Mata do Pau Ferro indicam efeitos significativos tanto do hábito (Arbóreo ou de solo) quanto da localização espacial (borda ou núcleo da floresta). Espécies arborícolas apresentaram limites térmicos superiores aos das espécies de solo segundo as quais organismos que ocupam o dossel são expostos a temperaturas mais elevadas e, portanto, selecionados por maior resistência ao calor. Adicionalmente, os indivíduos localizados no núcleo da floresta, independentemente do hábito, apresentaram consistentemente maior tolerância térmica. Essa tendência contraria a expectativa de que ambientes mais quentes, como as bordas, selecionam espécies termotolerantes. No entanto, segundo Boyle et al. (2020), esse padrão pode refletir a filtragem ambiental em curso, em que espécies menos tolerantes ainda persistem devido à heterogeneidade térmica local ou à conectividade com áreas menos perturbadas.

A ausência de interação entre os fatores ambientais indica que os efeitos do estrato vertical e do ambiente atuam consistentemente, com aumento do CTmax em direção ao núcleo florestal tanto nas comunidades do solo quanto nas da vegetação. A estrutura vertical da floresta funciona como um filtro térmico natural, promovendo condições de temperatura mais elevadas

nos estratos superiores, favorecendo a persistência de espécies termotolerantes a altas temperaturas (Leahy et al., 2021). Por outro lado, os efeitos de borda, associados à fragmentação, modificam a composição funcional das assembleias, impondo desafios adicionais à sobrevivência de espécies menos adaptadas a variações térmicas e condições ambientais mais extremas, especialmente com relação a picos térmicos e redução da umidade (Parr et al., 2022; Nascimento, Câmara e Arnan, 2024). No contexto das mudanças climáticas, há evidências de que a capacidade de adaptação fisiológica e comportamental das formigas pode ser insuficiente para compensar o aumento das temperaturas ambientais, tornando as comunidades mais vulneráveis a episódios de aquecimento crônico e subletal, especialmente em ambientes já sujeitos a filtros ambientais intensos, como bordas e áreas fragmentadas (Youngsteadt et al., 2023; Andrew et al., 2019). Assim, a intensificação das mudanças climáticas pode acentuar ainda mais os efeitos dos filtros ambientais, reduzindo a resiliência e a diversidade funcional das comunidades de formigas.

## REFERÊNCIAS

- ADDO-BEDIAKO, A.; CHOWN, S. L.; GASTON, K. J. Thermal tolerance, climatic variability and latitude. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 267, n. 1445, p. 739–745, 2000.
- ANDERSEN, Alan N. Ants as indicators of environmental change and management. *Myrmecological News*, v. 28, p. 135-144, 2018.
- ANDREW, N.; MILLER, Cara; HALL, G.; HEMMINGS, Z.; OLIVER, I. Aridity and land use negatively influence a dominant species' upper critical thermal limits. *PeerJ*, v. 7, e6341, 2019.
- ARROYO-RODRÍGUEZ, V. et al. Does forest fragmentation cause an increase in forest temperature? *Ecological Research*, v. 31, n. 6, p. 967-977, 2016.
- BARAHONA-SEGOVIA, R. M. et al. Anthropogenic thermal gradient in managed landscapes determines physiological performance and explains the edge-biased distribution of ectothermic arthropods. *Forest Ecology and Management*, v. 437, p. 1-10, 2019.
- BAUDIER, Kevin M.; MUDD, A. E.; ERICKSON, S. C.; O'DONNELL, S. Microhabitat and body size effects on heat tolerance: implications for responses to climate change (army ants: Formicidae, Ecitoninae). *The Journal of Animal Ecology*, v. 84, n. 5, p. 1322-1330, 2015.
- BOET, Olga; ARNAN, X.; RETANA, J. The role of environmental vs. biotic filtering in the structure of European ant communities: A matter of trait type and spatial scale. *PLoS ONE*, v. 15, n. 2, e0228625, 2020.
- BOYLE, M. J. W. et al. Thermal filtering of ants across elevation and microhabitat in a tropical montane forest. *Ecological Monographs*, v. 90, n. 1, p. 1–19, 2020.
- BRAUN, J.; LORTIE, C. J. Environmental filtering mediates desert ant community assembly at two spatial scales. *Oecologia*, v. 204, p. 1-13, 2024.

- BUJAN, J.; KASPAARI, M. Nutrition modifies critical thermal maximum of a dominant canopy ant. **Journal of Insect Physiology**, 2017.
- COSTA, W. S. et al. Intraspecific variation in functional wood anatomy of tropical trees caused by effects of forest edge. **Forest Ecology and Management**, v. 474, 118393, 2020.
- DANTAS, A.; DANTAS, T. A. V.; RIBEIRO-NETO, J. D. Pioneer palm tree as an ecosystem engineer: Effects on ant community structure. **Austral Ecology**, 2022.
- DANTAS, A.; MENEZES, R. F.; RIBEIRO-NETO, J. D.; ALENCAR, J. B. R.; BRITO, C. H. Rainy season decreases ground-dwelling ant richness, but increases the difference in species composition in a tropical relictual mountain forest. **Tropical Ecology**, 2024.
- DEUTSCH, C. A. et al. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 18, p. 6668-6672, 2008.
- FREIRES, A. S. A. et al. Carbohydrate-rich diet increases critical thermal maximum in ants. **Entomologia Experimentalis et Applicata**, 2023.
- GONZÁLEZ, E. et al. Something is lost and something is gained: loss and replacement of species and functional groups in ant communities at fragmented forests. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 817–829, 2018.
- HOFFMANN, A. A.; CHOWN, S. L.; CLUSELLA-TRULLAS, S. Upper thermal limits in terrestrial ectotherms: how constrained are they? **Functional Ecology**, v. 27, n. 4, p. 934-949, 2013.
- ISMAEEL, A. et al. Patterns of tropical forest understory temperatures. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2024.
- JORGENSEN, L. B. et al. Extreme escalation of heat failure rates in ectotherms with global warming. **Nature**, v. 611, p. 93-98, 2022.
- KASPAARI, M. et al. Thermal adaptation generates a diversity of thermal limits in a rainforest ant community. **Global Change Biology**, v. 21, n. 3, p. 1092-1102, 2015.
- KASPAARI, M. et al. Thermal adaptation generates a diversity of thermal limits in a rainforest ant community. **Global Change Biology**, v. 20, n. 11, p. 3650–3662, 2014.
- KASPAARI, M.; CLAY, N. A.; DONALD, J.; YANOVIAK, S. P. Thermal adaptation generates a diversity of thermal limits in a rainforest ant community. **Global Change Biology**, v. 21, n. 3, p. 1092–1102, 2015.
- KUMAR, A.; O'DONNELL, S. Microclimatic conditions and the distribution of Neotropical army ants. **Biotropica**, v. 40, n. 1, p. 94-99, 2008.
- LAW, S. Ant ecology and wood decomposition in a vertically stratified tropical ecosystem. 2019.
- LEAHY, L. et al. Arboreality drives heat tolerance while elevation drives cold tolerance in tropical rainforest ants. **Ecology**, v. 102, n. 10, e03413, 2021.
- LEAHY, Lily; SCHEFFERS, Brett R.; WILLIAMS, S.; ANDERSEN, A. Arboreality drives heat tolerance while elevation drives cold tolerance in tropical rainforest ants. **Ecology**, v. 102, n. 10, e03441, 2021.

- LEAHY, T. C. et al. Vertical stratification constrains the macroecology of arboreal ants. **Journal of Animal Ecology**, v. 90, n. 4, p. 893–904, 2021.
- MEEUSSEN, C. et al. Microclimatic edge-to-interior gradients of European deciduous forests. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 308-309, p. 108528, 2021.
- MOTTL, Ondřej; YOMBAI, J.; FAYLE, T.; NOVOTNÝ, V.; KLIMEŠ, P. Experiments with artificial nests provide evidence for ant community stratification and nest site limitation in a tropical forest. **Biotropica**, v. 52, n. 2, p. 312–321, 2020.
- NASCIMENTO, G.; CÂMARA, T.; ARNAN, X. Critical thermal maxima in neotropical ants at colony, population, and community levels. **Bulletin of Entomological Research**, 2024.
- NEWBOLD, T. et al. Non-native ants are breaking down biogeographic boundaries and homogenizing community assemblages. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1-10, 2024.
- PARR, C.; BISHOP, T. R. The response of ants to climate change. **Global Change Biology**, v. 28, n. 13, p. 3862-3879, 2022.
- PENICK, C.; DIAMOND, S.; SANDERS, N.; DUNN, R. Beyond thermal limits: comprehensive metrics of performance identify key axes of thermal adaptation in ants. **Functional Ecology**, v. 31, n. 5, p. 1091-1100, 2017.
- RIBEIRO-NETO, J. D. et al. Chronic anthropogenic disturbance causes homogenization of plant and ant communities in the Brazilian Caatinga. **Biodiversity and Conservation**, v. 25, p. 943–956, 2016.
- SANTOS, M. N.; DELABIE, J.; QUEIROZ, J. M. Biodiversity conservation in urban parks: a study of ground-dwelling ants (Hymenoptera: Formicidae) in Rio de Janeiro City. **Urban Ecosystems**, v. 22, p. 1-15, 2019.
- STARK, A. Y.; ADAMS, B. J.; FREDLEY, J. L.; YANOVIAK, S. P. Out on a limb: Thermal microenvironments in the tropical forest canopy and their relevance to ants. **Oecologia**, v. 183, p. 1007–1017, 2017.
- SUNDAY, J. M. et al. Thermal tolerance patterns across latitude and elevation. **Philosophical Transactions of the Royal Society B**, v. 374, n. 1778, p. 20190036, 2019.
- WIESCHER, P. T.; PEARCE-DUVET, J.; FEENER, D. Assembling an ant community: species functional traits reflect environmental filtering. **Oecologia**, v. 169, n. 4, p. 1063-1074, 2012.
- YOUNGSTEADT, E.; PRADO, S.; KELEHER, K.; KIRCHNER, M. Can behaviour and physiology mitigate effects of warming on ectotherms? A test in urban ants. **The Journal of Animal Ecology**, v. 92, n. 1, p. 180-192, 2023.
- ZELLWEGER, F. et al. Seasonal drivers of understorey temperature buffering in temperate deciduous forests across Europe. **Global Ecology and Biogeography**, v. 28, n. 12, p. 1774-1786, 2019.