



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

PEDRO LOPES PEREIRA TEIXEIRA

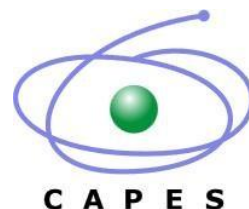
**MICROCLIMA EM ÁREAS EM RESTAURAÇÃO DE 20
ANOS E EM FRAGMENTOS FLORESTAIS NO NORTE DO
PARANÁ**



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
CIÊNCIAS BIOLÓGICAS



MICROCLIMA EM ÁREAS EM RESTAURAÇÃO DE 20 ANOS E EM FRAGMENTOS FLORESTAIS NO NORTE DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como um dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas.

Orientador: José Marcelo Domingues Torezan

Mestrando: Pedro Lopes Pereira Teixeira

Londrina

2026

PEDRO LOPES PEREIRA TEIXEIRA

MICROCLIMA EM ÁREAS EM RESTAURAÇÃO DE 20 ANOS E EM
FRAGMENTOS FLORESTAIS NO NORTE DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como um dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas.

Londrina

2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Lopes Pereira Teixeira, Pedro.

Microclima em áreas em restauração de 20 anos e em fragmentos florestais no norte do paraná / Pedro Lopes Pereira Teixeira. - Londrina, 2026.
61 f.

Orientador: José Marcelo Domingues Torezan.

Disserta    (Mestrado em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-Gradua    em Ciências Biológicas, 2026.

Inclui bibliografia.

1. Mata Atlântica - Tese. 2. Restaur    ecológica - Tese. 3. Fragmenta    - Tese. 4. Conserva    - Tese. I. Domingues Torezan, José Marcelo. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Gradua    em Ciências Biológicas. III. Título.

CDU 574

PEDRO LOPES PEREIRA TEIXEIRA

MICROCLIMA EM ÁREAS EM RESTAURAÇÃO DE 20 ANOS E EM
FRAGMENTOS FLORESTAIS NO NORTE DO PARANÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina - UEL, como um dos requisitos à obtenção do título de Mestre em Ciências Biológicas.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Marcelo Domingues Torezan
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Halley Caixeta Oliveira
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dra. Marcela Blagitz Ferraz do Nascimento
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dra. Alba Lúcia Cavalheiro
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. Cleber Ibraim Salimon
Universidade Estadual da Paraíba- UEPB

Londrina 06 de abril de 2026

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos profissionais de pesquisa, técnicos e funcionários do Laboratório de Biodiversidade e Restauração de Ecossistemas (LABRE), em especial ao meu orientador. Agradeço também aos queridos amigos que fiz durante toda a minha trajetória acadêmica e que muito contribuíram para esta pesquisa e para a minha formação.

Agradeço também à minha família amada, que está presente em todas as etapas da minha vida: pais, irmãos, tios, primos e companheira.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

TEIXEIRA, Pedro. **Microclima em áreas em restauração de 20 anos e em fragmentos florestais no norte do paraná**. 2026. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026

RESUMO

O Paraná, pertencente à área de abrangência da Mata Atlântica, originalmente possuía cobertura vegetal predominantemente florestal. Atualmente a paisagem encontra-se alterada principalmente em função da atividade agrícola extensiva e da formação dos centros urbanos. O desmatamento pode alterar o clima regional, pois sabe-se que as florestas atuam como reguladoras e atenuam os índices meteorológicos. Por outro lado, alterações na paisagem também podem levar a mudanças no microclima das florestas remanescentes, assim como influenciar áreas em recuperação. O presente trabalho integra o conjunto de pesquisas do Sítio Mata Atlântica do Norte do Paraná do Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração – PELD-MANP/CNPq – e tem como objetivo conhecer o comportamento das variáveis microclimáticas em fragmentos de floresta estacional semidecidual e em áreas em processo de restauração, visando dimensionar as diferenças entre estes ambientes. Para isso, foram instalados sensores de luminosidade, temperatura e umidade relativa do solo e temperatura e umidade do ar em três reflorestamentos com 20 anos de idade e em três fragmentos de mata adjacentes. As análises foram realizadas a partir de modelos lineares mistos (LMMs), generalizados (GLMMs) e modelos aditivos (GAMM). Os resultados demonstraram padrões consistentes e estatisticamente significativos, com os reflorestamentos apresentando, em média, maior luminosidade, maior umidade e temperatura do solo, menor umidade atmosférica e maior temperatura do ar, além de padrões sazonais bem definidos. Como consequência, indicam que, apesar dos avanços estruturais, os reflorestamentos ainda não apresentam condições microclimáticas semelhantes às observadas nos fragmentos florestais maduros, com possíveis consequências para o processo de restauração.

Palavras-chave: Mata Atlântica; Restaur  o ecológica; Fragmentação; Conservação.

TEIXEIRA, Pedro. **Microclimate in 20 year ecological restoration areas and forest fragments in northern paraná.** 2026. 61 pp. Dissertation (Master's Degree in Biological Sciences) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

ABSTRACT

Paraná, located within the Atlantic Forest biome, was originally covered predominantly by forests. Currently, its landscape has been substantially altered, mainly due to extensive agricultural activities and urban expansion. Deforestation may alter the regional climate, as forests are known to act as climate regulators and mitigate meteorological conditions. On the other hand, landscape changes may also lead to alterations in the microclimate of remnant forests and influence areas undergoing ecological recovery. This study is part of the research conducted at the Northern Paraná Atlantic Forest Site of the Long-Term Ecological Research Program (PELD-MANP/CNPq) and aims to characterize the behavior of microclimatic variables in Seasonal Semideciduous Forest fragments and ecological restoration areas in order to assess the differences between these environments. For this purpose, sensors measuring light intensity, soil temperature, soil moisture, air temperature, and relative air humidity were installed in three 20-year-old reforestation sites and three adjacent forest fragments. Analyses were performed using linear mixed models (LMMs), generalized linear mixed models (GLMMs), and generalized additive mixed models (GAMMs). The results revealed consistent and statistically significant patterns, with the reforestation sites presenting, on average, higher light intensity, higher soil moisture and soil temperature, lower relative air humidity, higher air temperature, and well-defined seasonal patterns. Consequently, the findings indicate that, despite structural advances, the reforestation sites have not yet achieved microclimatic conditions comparable to those observed in mature forest fragments, with possible implications for the ecological restoration process.

Keywords: Atlantic Forest; Ecological restoration; Fragmentation; Conservation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - LOCALIZAÇÃO DAS TRÊS ÁREAS DE ESTUDO, NO NORTE DO PARANÁ, BRASIL – FAZENDA ALVORADA, FAZENDA SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY, MUNICÍPIOS DE ALVORADA DO SUL, SERTANEJA E LONDRINA, RESPECTIVAMENTE. IMAGEM: GOOGLE EARTH.	18
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES MICROCLIMÁTICAS NOS LOCAIS DE ESTUDO, NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ. 2A) FAZENDA ALVORADA. 2B) FAZENDA SANTO ANTÔNIO. 2C) PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY. FF=FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL. RF=REFLORESTAMENTO COM ESPÉCIES NATIVAS (VER TEXTO PARA DETALHES). FONTE: PRÓPRIO AUTOR, IMAGEM GOOGLE EARTH.....	21
FIGURA 3 - ESTRUTURA MONTADA DA ESTAÇÃO MICROCLIMÁTICA, MOSTRANDO OS SENSORES E OS MATERIAIS DE PROTEÇÃO (3A); MICRO ESTAÇÃO HOBO EM FUNCIONAMENTO (3B).....	22
FIGURA 4 - MÉDIA DA LUMINOSIDADE, EM $\text{MMOL M}^{-2} \text{S}^{-1}$, NAS TRÊS ESTAÇÕES (1, 3 E 5) DE CADA AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)) E LOCAL (ALVORADA, SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025. .	28
FIGURA 5 - MÉDIA DA UMIDADE DO SOLO, EM M^3/M^3 , NAS TRÊS ESTAÇÕES (1, 3 E 5) DE CADA AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)) E LOCAL (ALVORADA, SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025. .	28
FIGURA 6 - MÉDIA DA TEMPERATURA DO SOLO, EM °C, NAS TRÊS ESTAÇÕES (1, 3 E 5) DE CADA AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)) E LOCAL (ALVORADA, SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025. .	29
FIGURA 7 - MÉDIA DA UMIDADE ATMOSFÉRICA, EM %, NAS TRÊS ESTAÇÕES (1, 3 E 5) DE CADA AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)) E LOCAL (ALVORADA, SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025. .	30
FIGURA 8 - MÉDIA DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA, EM °C, NAS TRÊS ESTAÇÕES (1, 3 E 5) DE CADA AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)) E LOCAL (ALVORADA, SANTO ANTÔNIO E PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025. .	31

FIGURA 9 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA MÉDIA DIÁRIA DA LUMINOSIDADE ($\text{MMOL M}^{-2} \text{S}^{-1}$) AO LONGO DOS MESES (NOVEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DO MODELO MISTO GENERALIZADO (GLMM; DISTRIBUIÇÃO GAMMA, LINK LOG). PONTOS E LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR MÊS, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.....	33
FIGURA 10 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA MÉDIA DIÁRIA DA UMIDADE DO SOLO (M^3/M^3) AO LONGO DOS MESES (NOVEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DO MODELO MISTO GENERALIZADO (GLMM; DISTRIBUIÇÃO BETA, LINK LOG). PONTOS E LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR MÊS, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.....	34
FIGURA 11 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA MÉDIA DIÁRIA DA TEMPERATURA DO SOLO ($^{\circ}\text{C}$) AO LONGO DOS MESES (NOVEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DO MODELO LINEAR MISTO (LMM, COM DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA). PONTOS E LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR MÊS, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%. ...	36
FIGURA 12 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA UMIDADE ATMOSFÉRICA (%) AO LONGO DAS HORAS DO DIA (00:00–24:00), EM DEZ DIAS (1 A 10 DE JANEIRO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DE UM MODELO ADITIVO MISTO GENERALIZADO (GAMM; DISTRIBUIÇÃO BETA, LINK LOGIT). LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR HORA, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.....	37
FIGURA 13 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA MÉDIA DIÁRIA DA UMIDADE ATMOSFÉRICA (%) AO LONGO DOS MESES (NOVEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DO MODELO MISTO GENERALIZADO (GLMM; DISTRIBUIÇÃO BETA, LINK LOG). PONTOS E LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR MÊS, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.....	38
FIGURA 14 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA ($^{\circ}\text{C}$) AO LONGO DAS HORAS DO DIA (00:00–24:00) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DE UM MODELO	

ADITIVO GENERALIZADO (GAMM; DISTRIBUIÇÃO GAUSSIANA). LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR HORA, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.	39
FIGURA 15 - MÉDIAS ESTIMADAS ($\pm$ IC 95%) DA MÉDIA DIÁRIA DA TEMPERATURA ATMOSFÉRICA (°C) AO LONGO DOS MESES (NOVEMBRO DE 2024 A AGOSTO DE 2025) E NOS AMBIENTES (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL (FF) OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO (RF)), OBTIDAS A PARTIR DO MODELO LINEAR MISTO (LMM; GAUSSINA). PONTOS E LINHAS REPRESENTAM AS MÉDIAS ESTIMADAS POR MÊS, COM INTERVALOS DE CONFIANÇA DE 95%.	
	41

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO, TODAS LOCALIZADAS NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, BRASIL. ALV-FAZENDA ALVORADA, ALVORADA DO SUL-PR; SAN-FAZENDA SANTO ANTÔNIO, SERTANEJA-PR; PEMG-PARQUE ESTADUAL MATA DOS GODOY, LONDRINA-PR. ALTITUDE EM METROS ACIMA DO NÍVEL DO MAR (M A.N.M.).....	20
TABELA 2. MÉDIAS E DESVIOS DAS VARIÁVEIS MICROCLIMÁTICAS (LUMINOSIDADE ($\text{MMOL M}^{-2} \text{S}^{-1}$), UMIDADE DO SOLO (M^3/M^3), TEMPERATURA DO SOLO ($^{\circ}\text{C}$), UMIDADE ATMOSFÉRICA (%) E TEMPERATURA ATMOSFÉRICA ($^{\circ}\text{C}$)) POR ESTAÇÃO MICROCLIMÁTICA (1, 2 E 3), AMBIENTE (FRAGMENTO DE FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL OU SÍTIO EM RESTAURAÇÃO) E LOCAL (VER TEXTO PARA DETALHES DOS LOCAIS), NO NORTE DO ESTADO DO PARANÁ, ENTRE SETEMBRO DE 2024 A SETEMBRO DE 2025.....	27
TABELA 3 - MODELOS LINEARES MISTOS (LMM) E MODELOS MISTOS LINEARES GENERALIZADOS (GLMM) PARA CADA VARIÁVEL MICROCLIMÁTICA ANALISADA, E RESPECTIVOS VALORES DE K (NÚMERO DE PARÂMETROS AVALIADOS PELO MODELO), AIC (CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AKAIKE) E ΔAICc (CRITÉRIO DE INFORMAÇÃO AKAIKE CORRIGIDO). OS MODELOS DESTACADOS EM NEGRITO FORAM SELECIONADOS PELO MENOR VALOR DE AIC, PARA CADA VARIÁVEL.....	42

Sumário

RESUMO	4
INTRODUÇÃO.....	12
MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
ÁREA DE ESTUDO	18
COLETA DE DADOS	20
ANÁLISE DE DADOS	23
RESULTADOS	26
ANÁLISE DESCRITIVA.....	26
ANÁLISES ESTATÍSTICAS	32
DISCUSSÃO	43
CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

INTRODUÇÃO

A partir da conferência Rio+20 da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2012, foram elaborados os 17 objetivos para alcançar o desenvolvimento sustentável (ODS) até 2030. O clima está relacionado com quase todos os objetivos que, a partir daquela conferência, se tornaram ainda mais relevantes em discussões de diversos setores da sociedade sobre as mudanças climáticas e suas consequências para vida na Terra. Conservar ambientes naturais e restaurar ecossistemas degradados são maneiras de alcançar tais objetivos. Dentro dessa perspectiva, os estudos acerca do microclima devem ser integrados à pesquisa ecológica como ferramenta fundamental para compreender e prever melhor como a biodiversidade e as funções das florestas se relacionam com o clima e as suas mudanças (DE FRENNE *et al.*, 2021).

Microclima pode ser definido como a variação do clima em escala local, isto é, as condições atmosféricas encontradas em uma área relativamente pequena, e normalmente diferem do seu entorno devido a uma barreira geomorfológica ou à própria vegetação (MENDONÇA; DANNI OLIVEIRA, 2007). Em ambientes florestais, microclimas são formados desde o solo até as copas das árvores, gerando diferentes condições para a sobrevivência de diversas espécies (GOTARDO *et al.*, 2019). As principais variáveis microclimáticas são a luminosidade, a temperatura e a umidade relativa do ar, a velocidade e a direção do vento. Pela importância para os organismos que vivem na camada superficial do solo ou sobre ele, incluindo plantas, a umidade e a temperatura do solo também podem ser consideradas descritoras do microclima.

Compreender as condições microclimáticas em ambientes florestais constitui um desafio, uma vez que essas condições resultam da interação de múltiplos fatores. Entre esses fatores, a cobertura do dossel exerce papel central na configuração do microclima, promovendo um efeito de amortecimento da radiação solar que chega à superfície e criando uma camada-

limite entre os espaços abaixo e acima do dossel e, também, entre habitats florestais e não florestais (PINTO *et al.*, 2010). A copa das plantas absorve parte significativa da radiação solar incidente, reduzindo a quantidade de energia que atinge o solo e as camadas inferiores do ar. Esse processo está diretamente relacionado ao índice de área foliar (IAF), definido como a razão entre a área total da superfície foliar e a área de solo subjacente (CHEN; BLACK, 1992). Copas densas, com valores elevados de IAF, podem bloquear mais de 95% da luz visível (BONAN, 2008), contribuindo para a redução da temperatura do ar e do solo, para a manutenção da umidade e para a diminuição da amplitude térmica diária sob o dossel (HARDWICK *et al.*, 2015).

Outro fator fundamental para a regulação das condições microclimáticas em ambientes florestais é a evapotranspiração, definida como o processo combinado de evaporação da água do solo e transpiração pelas plantas, o qual representa um componente central do balanço de água e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera (DEJONGE *et al.*, 2025). Esse processo contribui para o resfriamento do ambiente, uma vez que a perda de água por meio da transpiração e da evaporação exige energia na forma de calor, reduzindo a temperatura do ar e influenciando a umidade nas camadas inferiores da vegetação. Estudos demonstram que o aumento da cobertura vegetal intensifica a evapotranspiração e promove maior estabilidade microclimática. Nesse sentido, Wang *et al.* (2022) analisaram áreas em processo de restauração e verificaram elevação da umidade absoluta e relativa, associada à redução da temperatura, em decorrência do incremento da evapotranspiração resultante do aumento da área vegetada. Esses resultados evidenciam a importância dos processos fisiológicos da vegetação na modulação do microclima, especialmente em ecossistemas em recuperação.

Os estudos sobre o microclima passaram por um importante histórico de desenvolvimento científico, derivado inicialmente do estudo das dinâmicas do clima terrestre (RICHARDSON, 1922). Posteriormente, houve avanços no estudo das condições climáticas

locais na agricultura e em centros urbanos; na biologia, surgiram novas questões a respeito das condições climáticas de locais específicos, em que vivem determinadas espécies de animais e plantas. Assim, os estudos sobre microclima inicialmente abordaram a luminosidade em uma plantação, a temperatura no centro de uma grande cidade, ou as condições ótimas para diferentes organismos (ROSENBERG *et al.*, 1983; GEIGER *et al.*, 1995).

Atualmente, os estudos sobre o microclima são reconhecidos pela ciência como parte integrante das áreas da ecologia e da biogeografia. Compreender o microclima auxilia na interpretação das mudanças fisiológicas de um indivíduo ou de uma população frente às alterações climáticas, nas condições ecológicas de um determinado local, nas mudanças climáticas em escala global, nos padrões de biodiversidade e na gestão de ecossistemas (HYLANDER *et al.*, 2022). O estudo do microclima pode contribuir, por exemplo, para identificar quais são as condições abióticas ideais para a germinação de sementes de determinadas espécies ou como as alterações do clima em bordas florestais interferem na saúde de espécies arbóreas de grande porte.

Atualmente, as medições do microclima dependem, em grande parte, de equipamentos capazes de registrar continuamente os dados, reduzindo o tempo de trabalho de campo. São comuns pequenas estações (conhecidas como data logger) conectadas a sensores instalados *in situ* para a obtenção dos dados (EWERS, BANKS-LEITE, 2013; GOTARDO *et al.*, 2019; HARDWICK *et al.*, 2015; MICKLEY *et al.*, 2019).

O conhecimento do microclima também é importante para a Ecologia da Restauração, ciência que estuda a recuperação dos ecossistemas. A prática da restauração pode ser definida como o processo de auxiliar a regeneração de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído (SER, 2004). Esse objetivo pode ser alcançado por meio de diferentes técnicas, sendo comum o plantio de mudas de espécies nativas para recuperar ecossistemas florestais (KAGEYAMA *et al.*, 2008).

Ferracin *et al.* (2010) compararam variáveis climáticas entre uma floresta secundária e uma plantação de pinus e, embora tenham observado diferenças na temperatura e na umidade relativa do ar, essas diferenças não foram extremas, indicando que a área de silvicultura apresentava um microclima parecido com o da floresta nativa em recuperação. Uma possível explicação para esse fenômeno é a relação positiva entre a quantidade de área foliar do dossel e a regulação do microclima (HARDWICK *et al.*, 2015), ou seja, quanto mais denso o dossel, menores são as variações microclimáticas (BAKER *et al.*, 2014). Portanto, florestas — incluindo aquelas em processo de restauração — apresentam microclima mais estável quando comparados a áreas abertas ou degradadas.

Em outro estudo, Meyer *et al.* (2001) mostraram que pequena variação do microclima (entre fragmentos e reflorestamentos) já pode interferir nos processos ecológicos, com mudanças mais expressivas em locais específicos e em determinados períodos do dia, sugerindo que variações microclimáticas devem ser consideradas para compreender o desenvolvimento da restauração florestal. Assim, é esperado que reflorestamentos com poucos anos de desenvolvimento não apresentem microclima similar ao de um fragmento florestal maduro, afetando o estabelecimento de plantas, entre outros organismos. Fragmentos que não sofreram distúrbios recentes apresentam maior riqueza de espécies, maior proporção de plantas dispersas por animais e mais espécies não-pioneiras; há resultados sugerindo que uma floresta degradada, em processo de recuperação, poderia levar 65 anos para atingir 80% da proporção de espécies zoocóricas que um fragmento de floresta madura de Mata Atlântica possui. Portanto, mesmo sendo crucial restaurar áreas que passaram por distúrbios, é ainda mais valioso conservar florestas remanescentes (LIEBSCH *et al.*, 2008; SIVISACA *et al.*, 2024), pois as áreas em restauração devem demorar para oferecer condições microclimáticas, entre outras, adequadas à boa parte da biota regional.

Pequenas variações espaciais e temporais são suficientes para provocar alterações no

microclima, o que influencia diretamente a fisiologia dos organismos, as funções ecossistêmicas e processos como os ciclos biogeoquímicos. O interior de uma floresta, por exemplo, apresenta um microclima contrastante em relação ao seu entorno e, mesmo dentro desse ambiente, as condições microclimáticas se modificam ao longo do dia e em resposta às transformações da composição e estrutura da vegetação. Portanto, para compreender e prever melhor como a biodiversidade e as funções das florestas se relacionam com o clima e as mudanças climáticas, as medições devem ser realizadas de maneira localizada, contínua e integrada às pesquisas ecológicas (MACLEAN *et al.*, 2021; KEMPPINEN *et al.*, 2024).

Compreender como o microclima varia no espaço e no tempo é extremamente importante, principalmente devido ao agravamento dos impactos sofridos pelas mudanças climáticas. Com equipamento adequado é possível mapear a heterogeneidade do microclima em nível de paisagem e, assim, estudar como a biodiversidade e os ecossistemas respondem às variações climáticas e como se dá a dinâmica de distribuição das espécies frente a essas mudanças (ZELLWEGGER *et al.*, 2019).

Nesse contexto, iniciativas de monitoramento de longo prazo tornam-se fundamentais. O Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD), instituído em 1997 (BRASIL, 1997; BRASIL, 1998), promove pesquisas de caráter interdisciplinar com o objetivo de compreender, em longo prazo, os efeitos de perturbações de origem natural e/ou antrópica sobre a composição, a dinâmica e o funcionamento dos ecossistemas, além de avaliar a efetividade de políticas públicas e das ações de manejo voltadas à sua conservação (BRITO *et al.* 2020). O projeto “Mata Atlântica do Norte do Paraná” integra o PELD (PELD-MANP), realizando o monitoramento de longo prazo de fragmentos de floresta estacional semidecidual e de sítios de restauração, numa região predominantemente agrícola. A medição do microclima faz parte desse monitoramento.

Apesar dos avanços, ainda há escassez de estudos integrados que avaliem

simultaneamente múltiplas variáveis microclimáticas em áreas em restauração e fragmentos maduros ao longo do tempo. Nesse contexto, este estudo se diferencia por integrar monitoramento contínuo, múltiplas variáveis e comparação direta entre ambientes ao longo de um ciclo anual em áreas de Mata Atlântica.

Portanto, o objetivo deste estudo é conhecer o comportamento das variáveis microclimáticas em fragmentos de floresta estacional semidecidual e em áreas em processo de restauração, com o intuito de fornecer ferramentas que subsidiem i) o monitoramento dos fragmentos frente às mudanças climáticas, visando a conservação e ii) a avaliação da evolução dos reflorestamentos.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A paisagem da região norte do estado do Paraná apresenta predomínio absoluto de áreas destinadas à produção agrícola, com poucos fragmentos remanescentes de floresta estacional semidecidual (FES), uma fitofisionomia da Mata Atlântica. Este estudo foi realizado em três áreas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), cada uma localizada em um município, a saber: Alvorada do Sul, Sertaneja e Londrina. As duas primeiras áreas são propriedades particulares (Fazenda Alvorada e Fazenda Santo Antônio, respectivamente), nas quais os fragmentos florestais constituem a Reserva Legal de cada propriedade. A terceira área está localizada no Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG), uma das maiores e mais importantes Unidades de Conservação do estado.

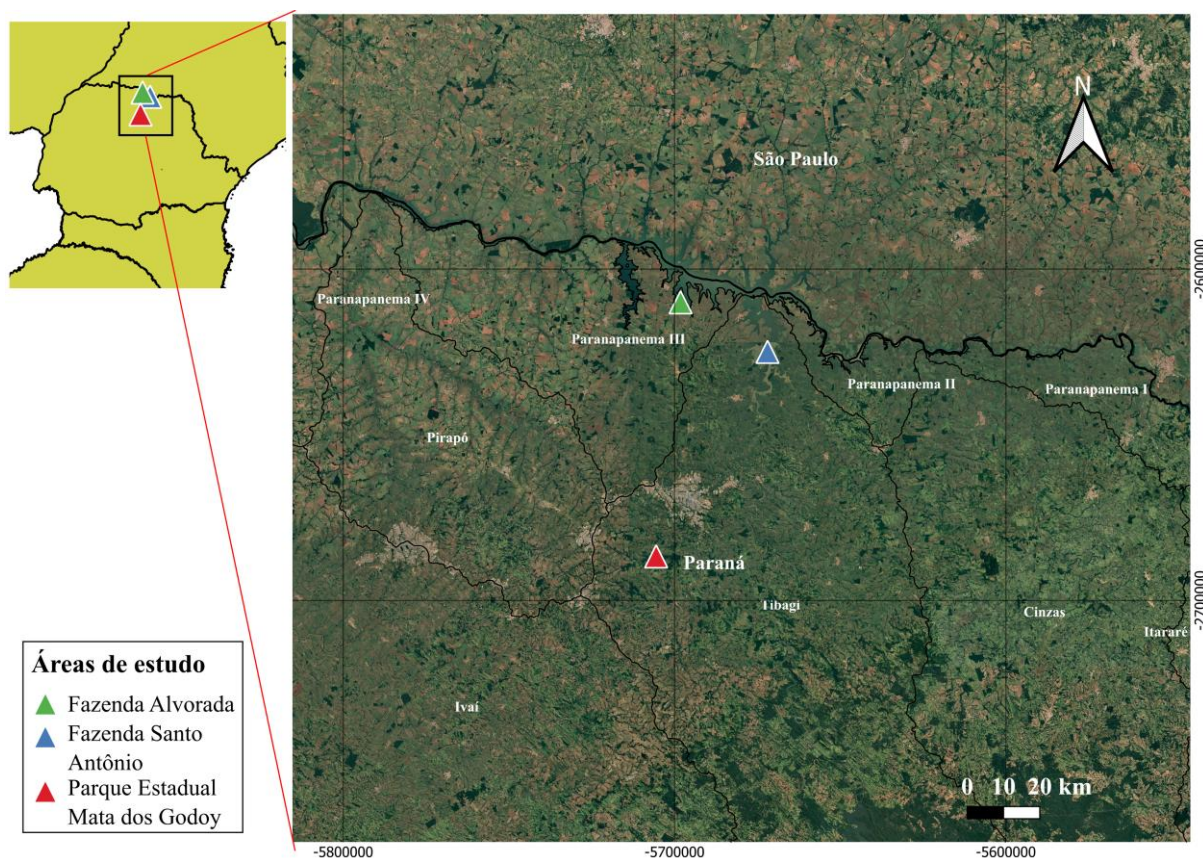


Figura 1 - Localização das três áreas de estudo, no Norte do Paraná, Brasil – Fazenda Alvorada, Fazenda Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy, municípios de Alvorada do Sul, Sertaneja e Londrina, respectivamente. Imagem: Google Earth.

Os três locais apresentam áreas em reflorestamento com mais de 20 anos de idade adjacentes aos fragmentos florestais, e fazem parte do conjunto de amostras do PELD-MANP.

O solo das três áreas é predominantemente do tipo Nitossolo Vermelho Eutroférico, com ocorrência de Latossolo Vermelho Eutroférico em menor proporção, formado a partir da intemperização de rochas basálticas, com alta fertilidade (Bhering *et al.*, 2007). O clima, segundo a classificação de Köppen, é do tipo CFa, subtropical úmido com verões quentes e chuvosos, e invernos com temperaturas mais amenas e baixa frequência de geadas. O PEMG, no entanto, está situado em maior altitude e mais próximo da transição para uma zona de clima Cfb, ao sul (MENDONÇA e DANNI-OLIVEIRA, 2002). Nestes climas, as condições no inverno do hemisfério sul envolvem redução da pluviosidade e da temperatura, que, por sua vez, causam repouso fisiológico na vegetação e queda de folhas em 20% a 50% das árvores, o que classifica a vegetação como floresta estacional semidecidual (IBGE, 2012).

A Fazenda Alvorada (22°48'S, 51°26'W), em Alvorada do Sul, conta com um fragmento florestal de 128 ha (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A Fazenda Santo Antônio (22°56'S, 50°57'W), em Sertaneja, possui um fragmento de 32 ha. As duas áreas florestais apresentam sinais de perturbação pretérita, como extração seletiva de madeira, resultando em aumento de clareiras e da abundância de cipós (CURY, 2009; TOREZAN e MARQUES, 2019). Ambos os fragmentos estão localizados às margens do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Capivara, onde, em 2001, foi iniciado um programa de reflorestamento pela concessionária da usina, juntamente com o consórcio de municípios da bacia do Capivara, o CIBACAP, em parceria com o Laboratório de Biodiversidade e Restauração de Ecossistemas da Universidade Estadual de Londrina (LABRE-UEL).

O Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG) (23°27'S, 51°15'W) está distante 15 km ao sul do centro urbano de Londrina, e é considerado uma importante área de conservação no norte do Paraná, com aproximadamente 670 ha de fragmento florestal formalmente protegidos,

que atualmente são parte de um bloco de 2800 ha de florestas maduras e secundárias. O fragmento do PEMG é um dos poucos na região onde não houve extração seletiva de madeira.

Tabela 1. Caracterização das áreas de estudo, todas localizadas no norte do estado do Paraná, Brasil. ALV-Fazenda Alvorada, Alvorada do Sul-PR; SAN-Fazenda Santo Antônio, Sertaneja-PR; PEMG-Parque Estadual Mata dos Godoy, Londrina-PR. Altitude em metros acima do nível do mar (m a.n.m.).

Área	Altitude	Área (ha)		Extração de madeira	Matriz
		FF	RF		
ALV	340	128	7	Sim	Agricultura de grãos e reservatório UHE
SAN	350	32	17	Sim	Agricultura de grãos e reservatório UHE
PEMG	620	670*	12	Não	Agricultura de grãos e floresta nativa

Entre 2002 e 2004 foram realizados os plantios de mudas de espécies de árvores nativas da região, com fins de restauração ecológica, sendo 7 ha na Fazenda Alvorada, 17 ha na Fazenda Santo Antônio e 12 ha no PEMG. As espécies utilizadas, as estratégias de implementação e de manutenção adotadas foram similares nos três reflorestamentos: preparação mecanizada do solo, sem adubação ou calagem e com plantio de mudas pioneiras e secundárias iniciais nativas da região, espaçadas em 3x2 m. A manutenção ativa se deu por meio de capina manual ou mecânica, sem uso de herbicidas, até o segundo ano após o plantio das mudas (MOTA e TOREZAN, 2013). Contudo, em algumas partes dos reflorestamentos ainda é possível observar características de fase inicial da sucessão ecológica, ou seja, o dossel ainda não apresenta uma formação completa e nota-se a presença significativa de *Megathyrsus maximus* (Jacq.), popularmente conhecido como capim-colonião, uma gramínea exótica invasora (MANTOANI *et al.*, 2016).

COLETA DE DADOS

Em cada um dos três locais de estudo foram instaladas estações microclimáticas (descritas abaixo), equipadas com sensores de radiação fotossinteticamente ativa, umidade volumétrica e temperatura do solo, umidade relativa e temperatura do ar, sendo três estações no

interior dos fragmentos e três no interior dos reflorestamentos adjacentes, totalizando 18 estações (seis em cada local) (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), com distância mínima de 200 m entre duas estações vizinhas. Os pontos onde foram instaladas as estações estão dentro ou ao lado das parcelas de estudo da vegetação do PELD-MANP.

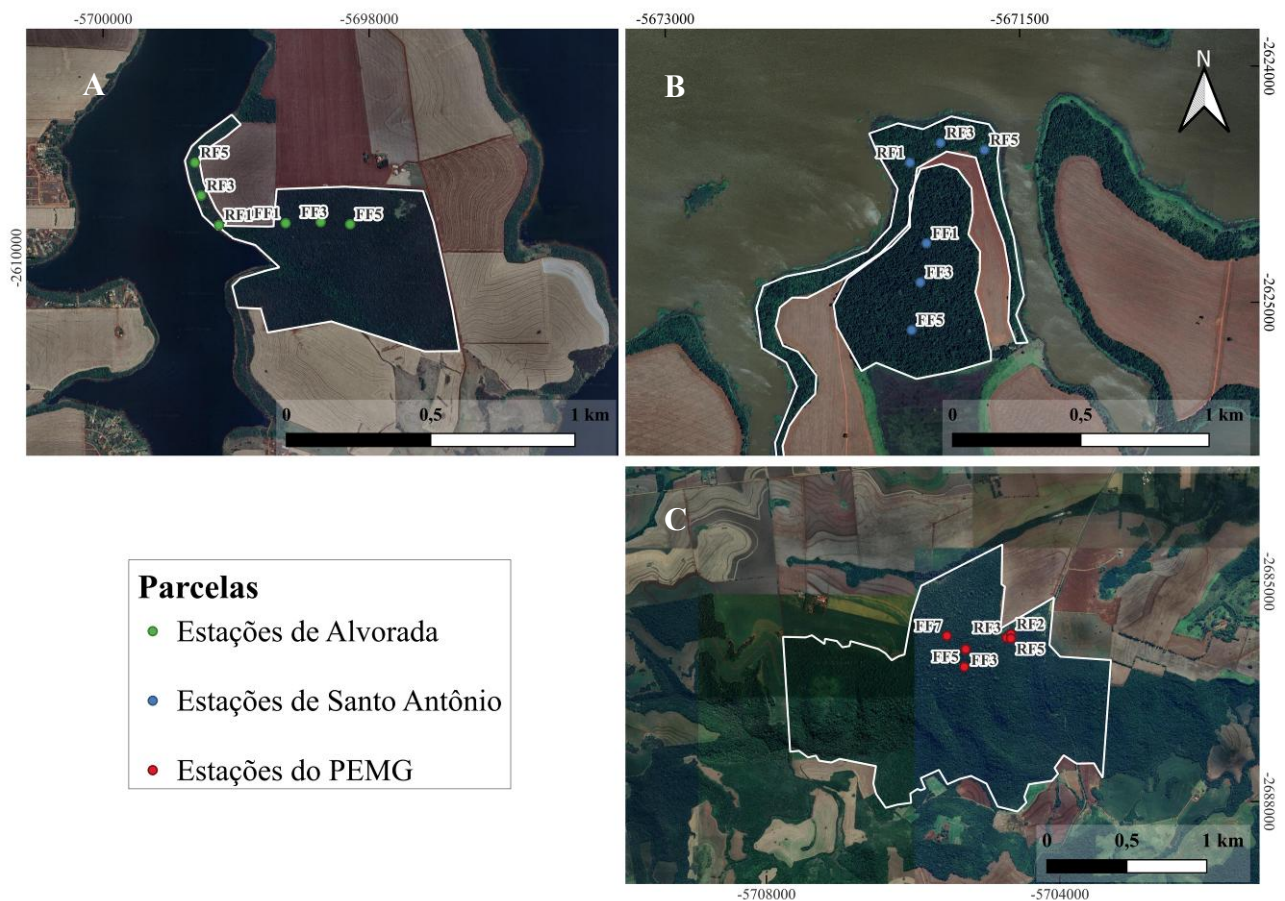


Figura 2 - Localização das estações microclimáticas nos locais de estudo, no norte do estado do Paraná. 2A) Fazenda Alvorada. 2B) Fazenda Santo Antônio. 2C) Parque Estadual Mata dos Godoy. FF=fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. RF=reflorestamento com espécies nativas (ver texto para detalhes). Fonte: próprio autor, imagem Google Earth.

Cada estação microclimática conta com uma base de sustentação de eucalipto de 2,50 m de altura enterrada cerca de 60 cm no solo. Os sensores foram acoplados nesta base seguindo um padrão de montagem, tomando o devido cuidado de proteger os sensores com materiais como mangueiras, partes de cano PVC e os próprios protetores vindos de fábrica, a fim de evitar eventuais danos causados por animais e/ou intempéries climáticas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**).



Figura 3 - Estrutura montada da estação microclimática, mostrando os sensores e os materiais de proteção (3A); Micro estação HOBO em funcionamento (3B).

Os sensores monitoraram a luminosidade na faixa fotossinteticamente ativa, em termos de fluxo de partículas ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), a umidade volumétrica do solo (m^3/m^3) e a umidade relativa do ar (em %), a temperatura do solo e da atmosfera ($^{\circ}\text{C}$), que foram registradas por coletores de dados eletrônicos automáticos (HOBO USB Micro Station Data Logger modelo H21-USB) instalados dentro ou ao lado das parcelas de estudo da vegetação, a um metro e meio de altura do solo. Os sensores de luminosidade (Hobo S-LIA-M003) foram instalados em nível e a aproximadamente 2 m do solo. Os sensores de umidade do solo (Hobo Echo S-SMC-M005, comprimento de 9 cm e medida volumétrica em 300 ml de solo) foram instalados entre a superfície e 10 cm de profundidade. Os sensores de temperatura do solo (Hobo S-TMB-M006) foram instalados com a extremidade sensível a 5 cm de profundidade, e os sensores de umidade

relativa do ar e temperatura atmosférica (Hobo S-THC-M002) a 1,8 m do solo, protegidos por um abrigo em plástico e alumínio fornecido pelo fabricante.

O equipamento ficou continuamente ligado e foi programado para realizar as medições a cada uma hora entre setembro de 2024 e setembro de 2025. As estações foram vistoriadas mensalmente, tanto para verificação do funcionamento, bem como para coleta dos dados armazenados.

O sensor de umidade do solo de uma das estações no reflorestamento de Alvorada apresentou problemas, de forma que estão disponíveis os dados de apenas duas estações para o período aqui analisado. Outros sensores de umidade do solo em outros locais apresentaram falhas em períodos curtos. Diante disso, para uma modelagem estatística mais adequada, foi considerado o período de novembro de 2024 a agosto de 2025, pois nesse intervalo houve coleta em todos os dias, abrangendo todos os locais e estações amostrais, com o máximo de sensores ativos.

ANÁLISE DE DADOS

Primeiramente foram feitas análises descritivas dos dados das cinco variáveis microclimáticas (média e o desvio padrão, valores máximos e mínimos, por ambiente) utilizadas nos gráficos comparativos dos resultados.

Em seguida, testou-se os efeitos do ambiente (fragmento e reflorestamento), dos meses (a sazonalidade do período de estudo) e da interação entre ambiente e mês para as cinco variáveis microclimáticas. Foram utilizadas análises de modelos lineares mistos (LMM), modelos mistos generalizados (GLMM), modelos aditivos generalizados (GAM) e modelos mistos aditivos generalizados (GAMM), todas elas realizadas no programa R, versão R 4.5.1 (R Core Team (2025)). De forma geral, ambiente e mês foram considerados fatores fixos e local

e estação fatores aleatórios. Por fim, também foi testado o efeito da variação diária (hora) para as variáveis umidade e temperatura atmosférica a partir dos modelos aditivos.

Para cada variável de microclima, primeiramente foi testado o modelo linear misto (LMM) com distribuição gaussiana, usando a função `lmer()` do pacote `lme4`; os resíduos foram verificados a partir dos testes do pacote DHARMA (HARTIG, 2017), que indicou que os modelos não estavam ajustados às variáveis através de quatro parâmetros: uniformidade dos resíduos, KS Test (Deviation Test), Dispersion Test e Outlier Test. Posteriormente, utilizou-se modelos lineares mistos generalizados (GLMMs) no pacote `glmmTMB`. Por fim, no caso das variáveis atmosféricas, usou-se o pacote `mgecv` para os modelos aditivos GAM e GAMM. A escolha da distribuição e função de ligação (Beta e Gamma), apresentadas nos resultados, foi baseada na natureza da variável resposta (contínua, positiva, proporção), inspeção gráfica (histogramas) e diagnóstico dos resíduos (DHARMA). Além disso, foram realizados testes para significância do modelo em relação ao modelo nulo e testes para significância das variáveis aleatórias. Todos os pacotes utilizados são do programa R

O modelo escolhido como mais adequado foi aquele que apresentou menor valor de AIC (Critério de Informação de Akaike), levando em consideração que esses valores só foram comparados entre modelos correlacionados para uma mesma variável, com mesma distribuição e função de ligação.

Nos modelos que avaliaram o efeito dos meses (sazonalidade), foram utilizadas as médias diárias de cada variável, a fim de suavizar valores extremos comuns em análises microclimáticas (por exemplo, quando feixes de luz atingiam o sensor devido à ação do vento no dossel, ou em registros de temperaturas máximas e mínimas muito elevadas) e, conseqüentemente, reduzir a influência de outliers. Além disso, para a luminosidade foram considerados apenas os dados medidos entre 07:00h e 18:00h, desconsiderando os valores noturnos.

Já nos modelos aditivos, que testaram a variação diária (hora) da temperatura e da umidade atmosférica, foi definido um período de dez dias (01 a 10 de janeiro), correspondente ao pico do verão, também com o objetivo de evitar a sobrecarga computacional dos modelos.

RESULTADOS

ANÁLISE DESCRITIVA

Diferenças entre fragmento e reflorestamento foram encontradas, e as médias das variáveis microclimáticas de cada estação podem ser visualizadas na Tabela 2.

As médias da luminosidade foram, em grande parte dos casos, maiores no reflorestamento (Tabela 2), com exceção das estações 3 e 5 do Parque Estadual Mata dos Godoy (PEMG), ambas estações localizadas próximas a clareiras originadas pela queda de uma árvore de grande porte (ocorrida após a instalação das estações); esse efeito pode ser visualizado no gráfico da média entre as estações do PEMG (Figura 4). Os maiores valores foram registrados entre os meses de novembro e março, com máxima de $2194 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (valor compatível com exposição do sensor à insolação direta) na estação 3 do reflorestamento de Alvorada, no mês de dezembro. Os valores mínimos de $1,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ referem-se aos períodos da noite e devem ser considerados como aproximadamente zero, uma vez que estão abaixo da acurácia do sensor ($\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Os valores registrados durante a noite foram considerados para o cálculo das médias apresentadas na Tabela 2, contudo foram descartados para a elaboração do gráfico apresentado na Figura 4 e para os modelos estatísticos.

A umidade do solo foi maior nos reflorestamentos (Figura 5). Contudo, a maior média de todo período ($0,254 \text{ m}^3/\text{m}^3$, aproximadamente 25% do volume do solo sendo representado por água) foi registrada na estação 3 do fragmento do PEMG e o maior valor ($0,488 \text{ m}^3/\text{m}^3$) foi registrado em fevereiro, na estação 1 do fragmento de Santo Antônio (SAN). O valor mínimo foi de $0,015 \text{ m}^3/\text{m}^3$ na estação 1 do fragmento de Alvorada (ALV), no início do mês de agosto. Durante este período de seca, que se configurou a partir do mês de julho, os valores de umidade do solo foram consideravelmente baixos (menores que $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$) nos fragmentos de SAN e ALV; nesse mesmo período apenas o fragmento do PEMG apresentou valores um pouco mais elevados, próximos a $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Tabela 2. Médias e desvios das variáveis microclimáticas (luminosidade ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), umidade do solo (m^3/m^3), temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$), umidade atmosférica (%) e temperatura atmosférica ($^{\circ}\text{C}$)) por estação microclimática (1, 2 e 3), ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual ou sítio em restauração) e local (ver texto para detalhes dos locais), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a setembro de 2025.

Local		média	DV	média	DV	média	DV
Ambientes / estações		1		3		5	
Luminosidade							
ALV	Fragmento	19,77	65,88	5,83	20,56	8,83	49,89
	Reflorestamento	28,84	123,41	67,40	244,74	37,75	153,47
SAN	Fragmento	8,97	52,77	19,66	88,00	17,80	44,66
	Reflorestamento	17,59	72,29	29,31	111,99	31,33	104,50
PEM	Fragmento	7,52	33,74	53,28	220,43	36,16	179,84
	Reflorestamento	26,90	106,76	44,49	151,15	26,18	107,01
Umidade do solo							
ALV	Fragmento	0,09	0,06	0,17	0,05	0,14	0,06
	Reflorestamento			0,23	0,05	0,25	0,06
SAN	Fragmento	0,14	0,07	0,16	0,05	0,16	0,05
	Reflorestamento	0,19	0,04	0,21	0,03	0,18	0,04
PEM	Fragmento	0,23	0,04	0,25	0,03	0,15	0,05
	Reflorestamento	0,20	0,04	0,23	0,05	0,22	0,04
Temperatura do solo							
ALV	Fragmento	21,76	3,64	21,37	3,51	21,39	3,26
	Reflorestamento	21,84	3,05	22,53	2,64	22,02	3,14
SAN	Fragmento	22,03	2,48	23,51	3,00	21,95	2,66
	Reflorestamento	22,01	2,84	22,25	3,00	22,17	2,95
PEM	Fragmento	19,71	3,04	20,60	3,41	22,58	1,56
	Reflorestamento	20,76	3,12	21,09	3,16	20,79	2,88
Umidade atmosférica							
ALV	Fragmento	83,01	15,03	83,21	13,90	81,59	13,87
	Reflorestamento	79,08	15,70	78,75	15,78	79,34	15,50
SAN	Fragmento	84,00	15,06	78,09	14,59	80,97	15,76
	Reflorestamento	83,24	13,48	82,21	13,91	79,07	13,88
PEM	Fragmento	85,72	11,00	83,86	11,67	87,29	11,91
	Reflorestamento	81,68	13,42	82,75	13,61	83,37	13,12
Temperatura atmosférica							
ALV	Fragmento	21,76	5,75	21,18	5,80	21,32	5,60
	Reflorestamento	22,56	5,60	22,84	5,55	22,07	5,58
SAN	Fragmento	22,05	5,11	22,65	5,28	22,00	5,55
	Reflorestamento	22,08	4,98	22,16	5,16	22,34	5,30
PEM	Fragmento	19,29	4,67	20,13	4,72	21,73	3,63
	Reflorestamento	20,62	4,81	20,84	4,86	20,65	4,77

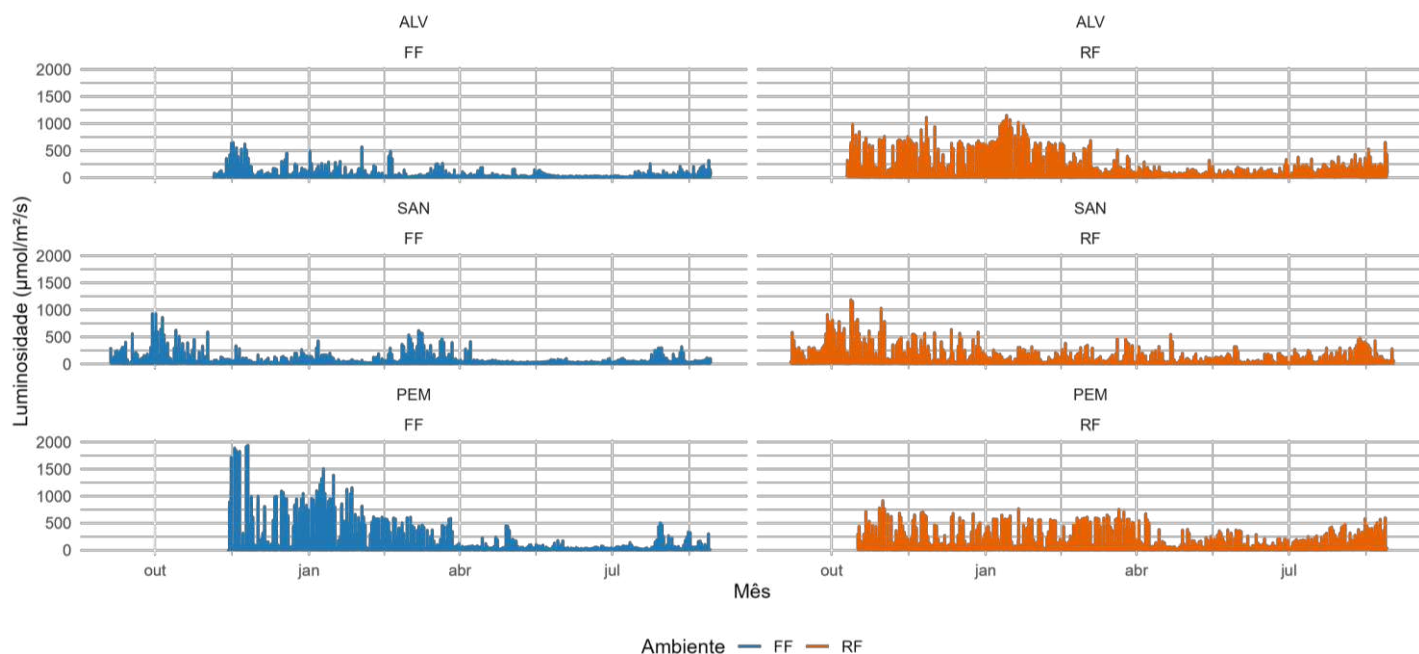


Figura 4 - Média da luminosidade, em $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, nas três estações (1, 3 e 5) de cada ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)) e local (Alvorada, Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a agosto de 2025.

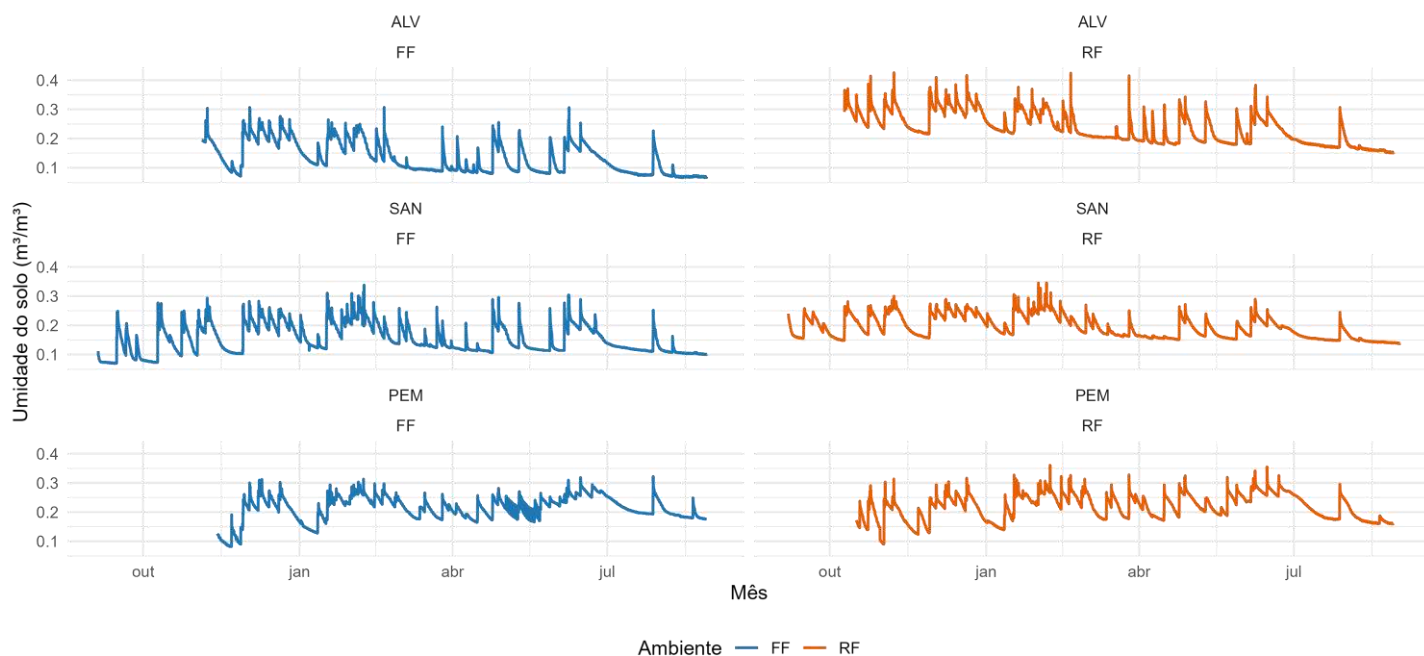


Figura 5 - Média da umidade do solo, em m^3/m^3 , nas três estações (1, 3 e 5) de cada ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)) e local (Alvorada, Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a agosto de 2025.

A temperatura do solo registrou as médias mais altas entre os meses de fevereiro e março, superando os $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e chegando até $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de média (figura 6). A média mais alta

considerando todo o período foi de 23,5 °C na estação 3 do fragmento de SAN, e o valor máximo registrado foi de 35,1 °C por volta das 16:00 no mês de fevereiro nesta mesma estação. A temperatura do solo caiu drasticamente em todos os locais e ambientes na metade do mês de junho, com mínima de 10,6 °C na estação 3 do fragmento do PEMG por volta das 10:00 horas da manhã no final de junho, quando a temperatura atmosférica estava próxima dos 3 °C. A menor média considerando todo o período foi de 19,7 °C na estação 1 do fragmento do PEMG.

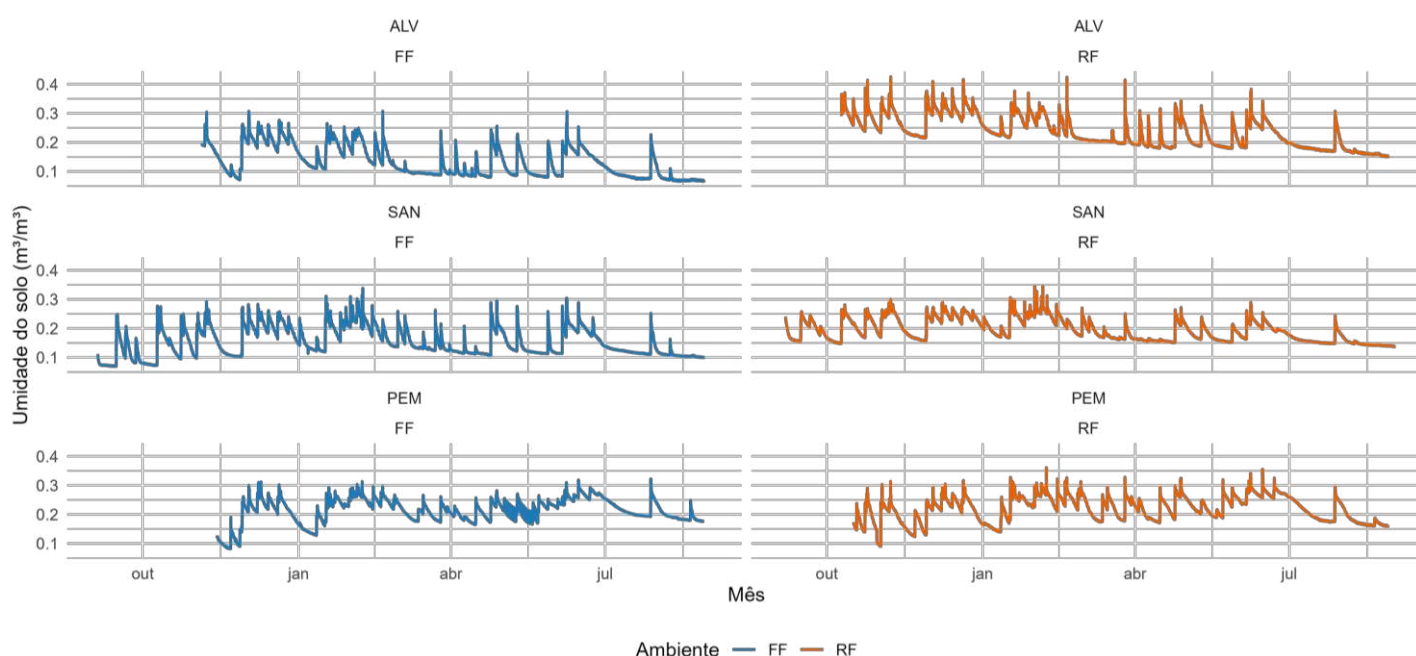


Figura 6 - Média da temperatura do solo, em °C, nas três estações (1, 3 e 5) de cada ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)) e local (Alvorada, Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a agosto de 2025.

As médias da umidade atmosférica foram maiores nos fragmentos (figura 7). A maior média de todo período (87,2%) foi registrada na estação 5 do fragmento do PEMG, e quase todas as estações registraram o valor máximo de 100%. Apesar dessa notável diferença, a menor média, considerando todo o período, foi 78,0% na estação 3 do fragmento de SAN e o valor mínimo registrado foi 15,67% na estação 5 também no fragmento de SAN por volta das 16:00 no início do mês de outubro.

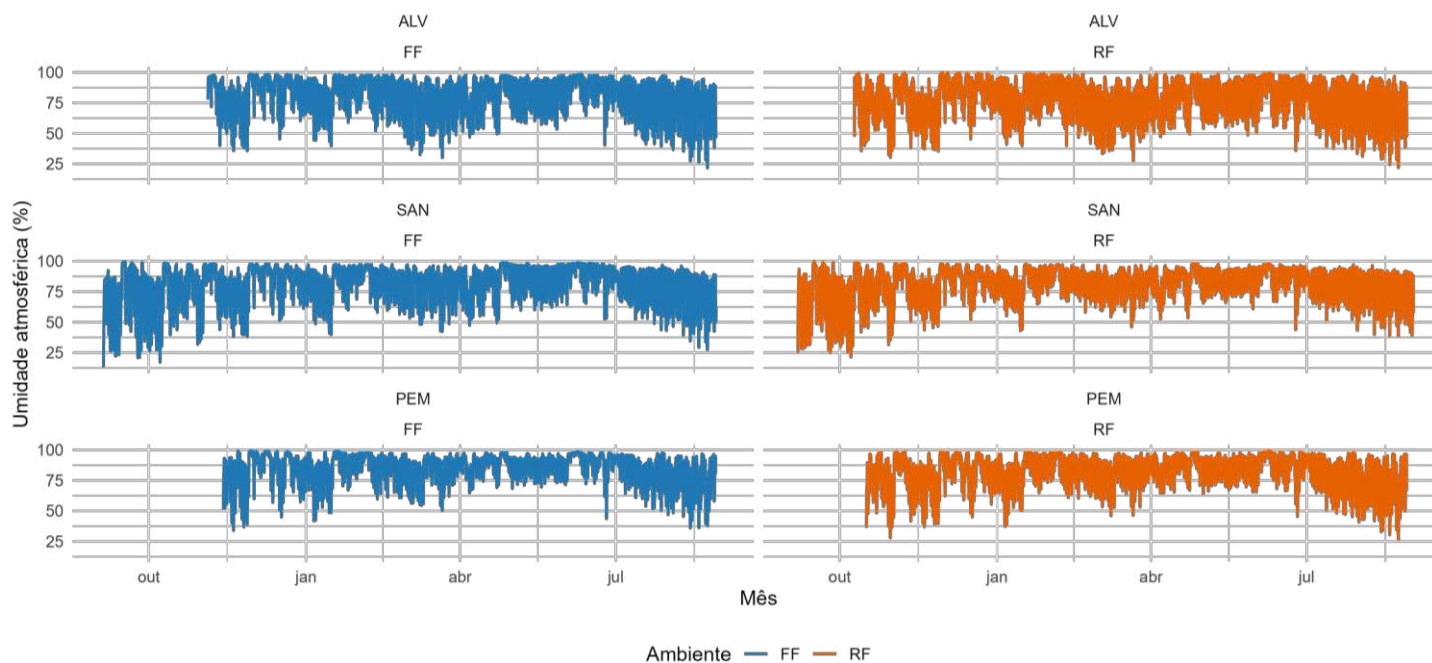


Figura 7 - Média da umidade atmosférica, em %, nas três estações (1, 3 e 5) de cada ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)) e local (Alvorada, Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a agosto de 2025.

Notou-se diferença da temperatura atmosférica entre fragmento e reflorestamento, sendo mais alta no reflorestamento como será descrito mais para frente nos resultados, apesar de não aparentar visualmente no gráfico (figura 8). O período mais quente ocorreu entre os meses de outubro e fevereiro, com a maior média de todo período (22,8 °C) registrada na estação 3 do reflorestamento de ALV, e o valor máximo de 40,1°C registrado nas estações 1 e 5 do reflorestamento de SAN. A temperatura diminuiu drasticamente a partir do mês de junho, e a menor média considerando todo o período foi de 19,3°C na estação 1 do fragmento do PEMG. Já a mínima registrada foi de 0,1°C na estação 3 do fragmento de ALV por volta das 04:00 horas da madrugada no final do mês de junho.

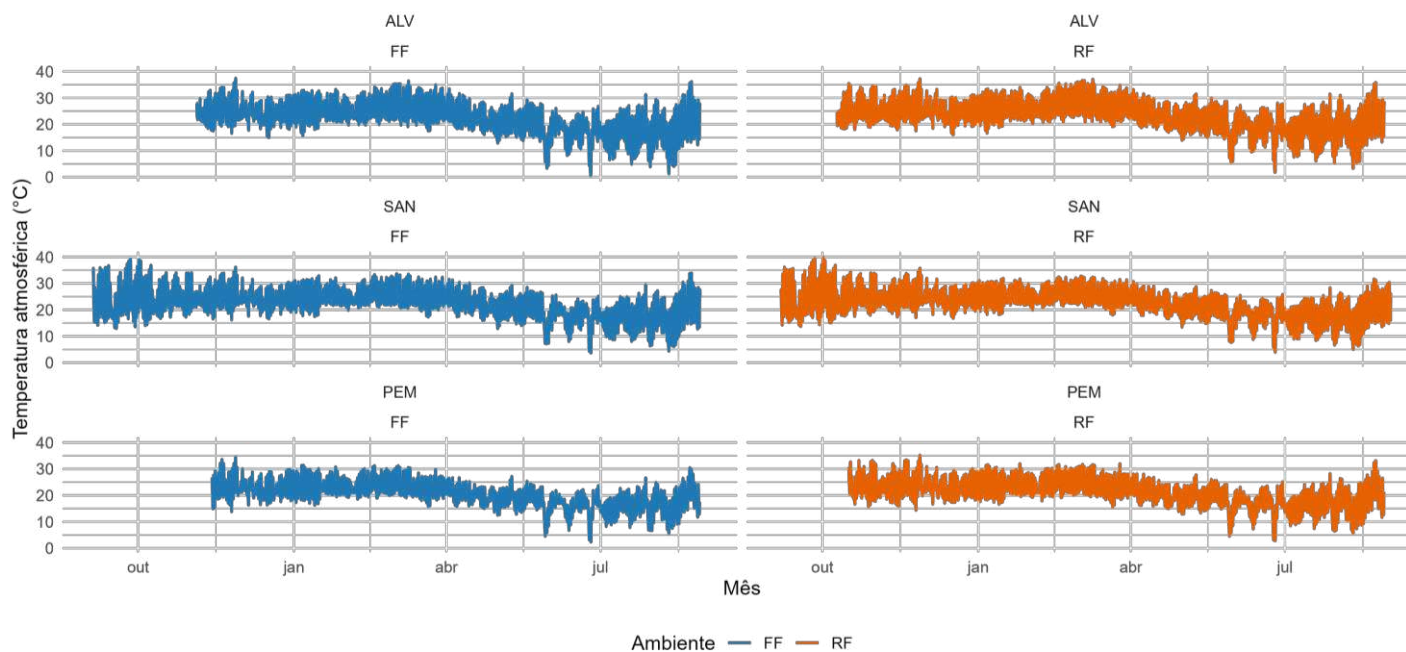


Figura 8 - Média da temperatura atmosférica, em °C, nas três estações (1, 3 e 5) de cada ambiente (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)) e local (Alvorada, Santo Antônio e Parque Estadual Mata dos Godoy), no norte do estado do Paraná, entre setembro de 2024 a agosto de 2025.

A partir dos dados é possível notar as mudanças das condições ambientais durante o período de coleta em todos os locais, ou seja, mudanças bem distintas e definidas que podem ser associadas à sazonalidade. Contudo estas variações foram diferentes entre fragmentos e reflorestamentos, em geral com maior amplitude nestes últimos.

ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Luminosidade

Para a variável luminosidade, foram utilizadas médias diárias, excluindo-se os valores noturnos registrados entre 18:00 e 07:00 h. Com relação ao modelo, o mais adequado foi obtido por GLMM com inclusão de interação entre ambiente e mês (sazonalidade) (Tabela 3, a), com distribuição Gamma e função de ligação Log.

O modelo final indicou efeito significativo do ambiente, do mês e da interação ambiente x mês sobre a luminosidade média diária. No mês de referência, ou seja, o marco temporal inicial da pesquisa que é utilizado como base de comparação para avaliar mudanças ao longo de todo o período, no caso em nov/2024 o ambiente reflorestamento (RF) apresentou, em média, 71% mais luminosidade do que o fragmento florestal (FF) ($p < 0,001$). A sazonalidade também foi altamente significativa, pois a luminosidade variou acentuadamente ao longo do tempo, com valores mais elevados entre novembro e janeiro e uma queda expressiva entre março e julho (outono e inverno). A interação ambiente x mês foi significativa em meses específicos (ex.: dez/2024, mai/2025, jun/2025 e ago/2025), indicando que a diferença entre ambientes também varia entre os meses, sendo menor no período mais úmido, correspondente ao verão.

Em todos os meses avaliados, a luminosidade estimada (ou seja, valor encontrado controlando os efeitos aleatórios dos locais e das estações) foi maior no reflorestamento ($p < 0.0001$). A maior diferença entre as médias estimadas de luminosidade nos ambientes ocorreu em nov/2024, quando foi $71,90 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no fragmento e $122,70 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no reflorestamento. De maneira geral, diferenças maiores ocorreram nos meses mais quentes e uma menor diferença nos meses mais frios (Figura 9).

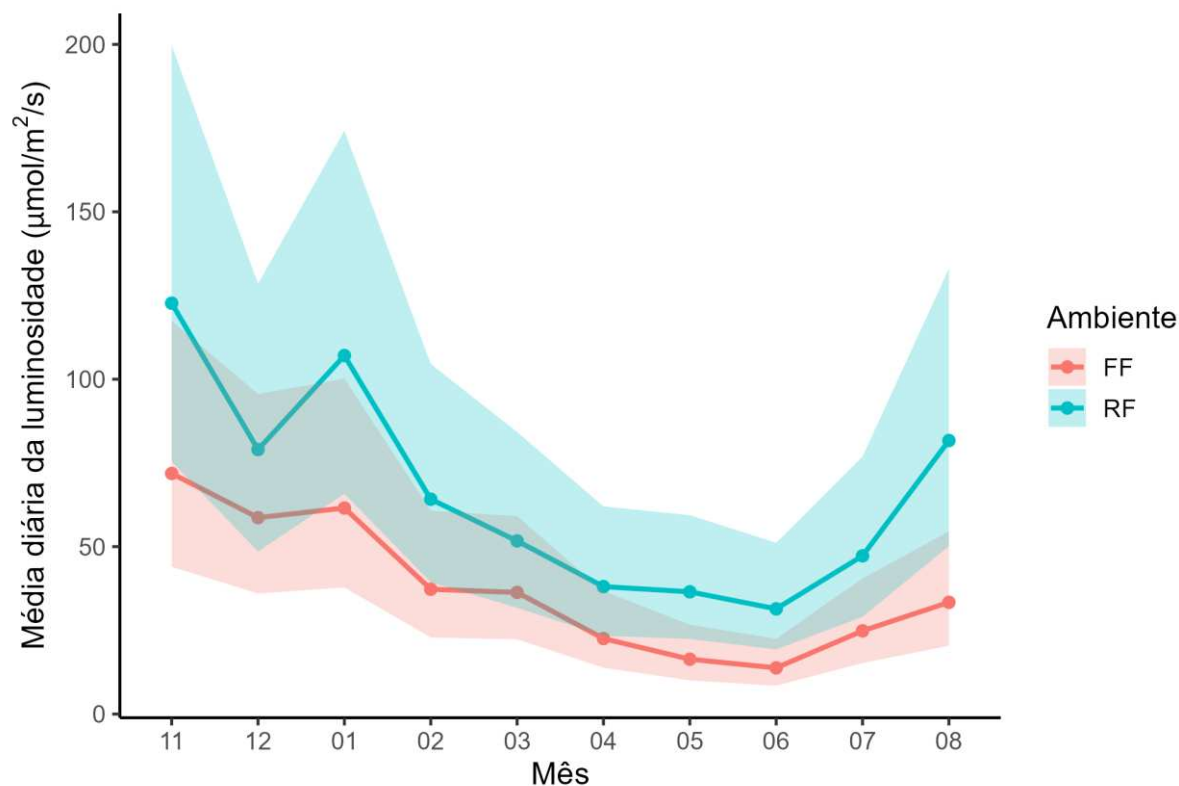


Figura 9 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da média diária da luminosidade ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ao longo dos meses (novembro de 2024 a agosto de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir do modelo misto generalizado (GLMM; distribuição Gamma, link log). Pontos e linhas representam as médias estimadas por mês, com intervalos de confiança de 95%.

Umidade do solo

Para a umidade do solo não houve influência da variação da hora dentro do mesmo dia, portanto foi utilizada a média diária nas análises seguintes. O modelo mais adequado foi o obtido por GLMM com efeito de interação entre ambiente e mês (sazonalidade) (Tabela 3, b) com distribuição Beta e função de ligação Log, pois os valores dessa variável encontram-se entre 0 e 1 (correspondendo a 0% e 100% de água no solo, valor teórico, acima da capacidade do sensor e dos valores reais medidos).

O modelo final indicou forte efeito significativo para ambiente. No mês de referência (nov/2024), o ambiente RF apresentou, em média, $0,04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ mais umidade do solo que o FF ($p < 0,001$), ou seja, 26,5% maior. O mês (sazonalidade) teve efeito altamente significativo, mostrando variação temporal clara, com aumentos (ex.: dez/2024, fev/2025, jun/2025) e

reduções (ex.: mar/2025, abr/2025, mai/2025, jul/2025, ago/2025), todos com $p < 0.001$. O efeito da interação ambiente x mês ocorreu em meses específicos e com menor significância, indicando que a diferença entre RF e FF muda ao longo do tempo em momentos específicos, com efeitos detectáveis em: dez/2024 ($p = 0.010$), mar/2025 ($p = 0.041$), mai/2025 ($p = 0.023$), jul/2025 ($p = 0.028$) e ago/2025 ($p = 0.004$).

A razão entre as médias dos ambientes indicou que a umidade do solo foi maior em RF em todos os meses avaliados ($p < 0.0001$), porém esse efeito não foi constante e variou com a sazonalidade. O mês de agosto apresentou a maior diferença, com RF 52% maior que FF, e no mês de dezembro foi registrada a menor diferença, com RF 20% maior que FF (Figura 10).

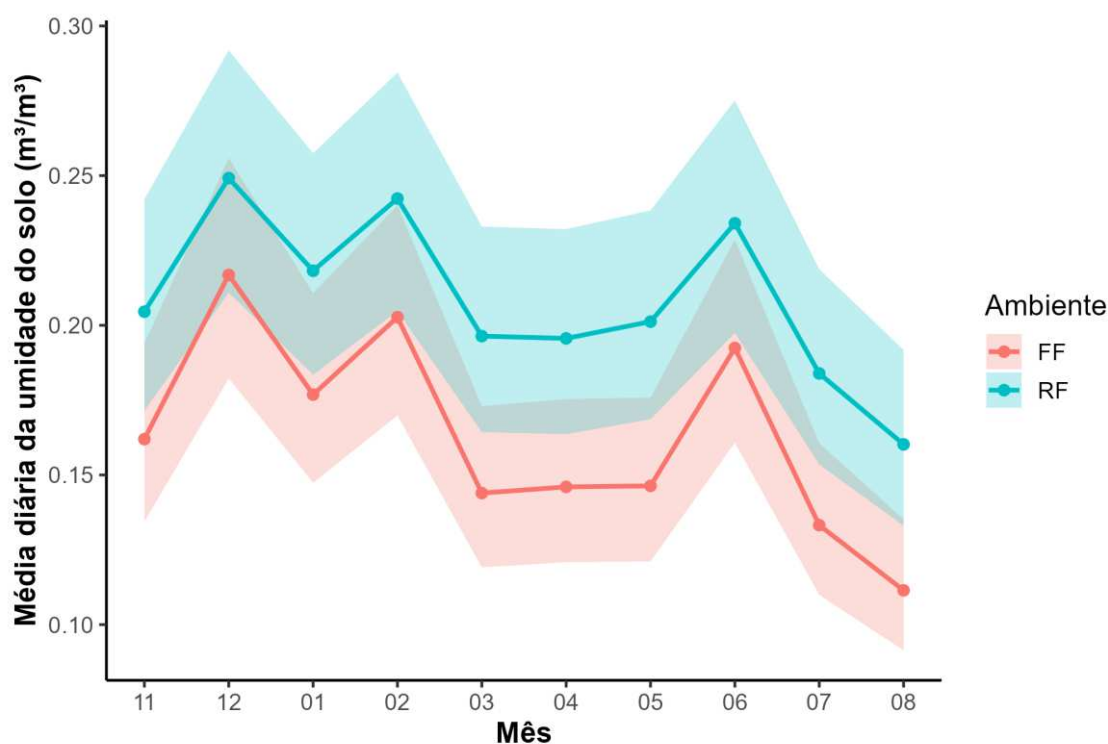


Figura 10 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da média diária da umidade do solo (m^3/m^3) ao longo dos meses (novembro de 2024 a agosto de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir do modelo misto generalizado (GLMM; distribuição Beta, link log). Pontos e linhas representam as médias estimadas por mês, com intervalos de confiança de 95%.

Temperatura do solo

Para a temperatura do solo também não houve influência da variação da hora dentro do dia, portanto foi utilizada a média diária. Essa variável apresentou distribuição normal, de forma

que o modelo mais adequado foi o linear misto (LMM) com distribuição Gaussiana (Normal) e função de ligação identidade (link = identity), incluindo ambiente, mês e a interação ambiente x mês como efeitos fixos, e interceptos aleatórios para local e estação (Tabela 3, c).

O modelo final indicou efeito significativo do ambiente no mês de referência (nov/2024), em que a temperatura do solo do reflorestamento foi 0,28 °C mais quente ($p = 0,007$). Também indicou forte sazonalidade, pois houve variação bastante aparente ao longo dos meses (todos com $p < 0,0001$), com evidente aumento da temperatura no verão (dez–fev) e queda acentuada no outono/inverno (mai–ago). Com relação à interação ambiente $\times$ mês, a diferença entre ambientes não foi constante ao longo do tempo, e apenas dois meses apresentaram interações significativas: fev/2025 (-0,29 °C; $p = 0,047$) e ago/2025 (+0,37 °C; $p = 0,012$).

As médias estimadas de temperatura do solo foram maiores no reflorestamento em quase todos os meses, com exceção de fevereiro, em que o fragmento foi, em média, 0,08 °C mais quente (Figura 11). Contudo, as diferenças entre as médias estimadas foram significativas apenas em dois meses (maio e agosto), e a maior diferença ocorreu em agosto, quando o reflorestamento foi, em média, 0,65 °C mais quente.

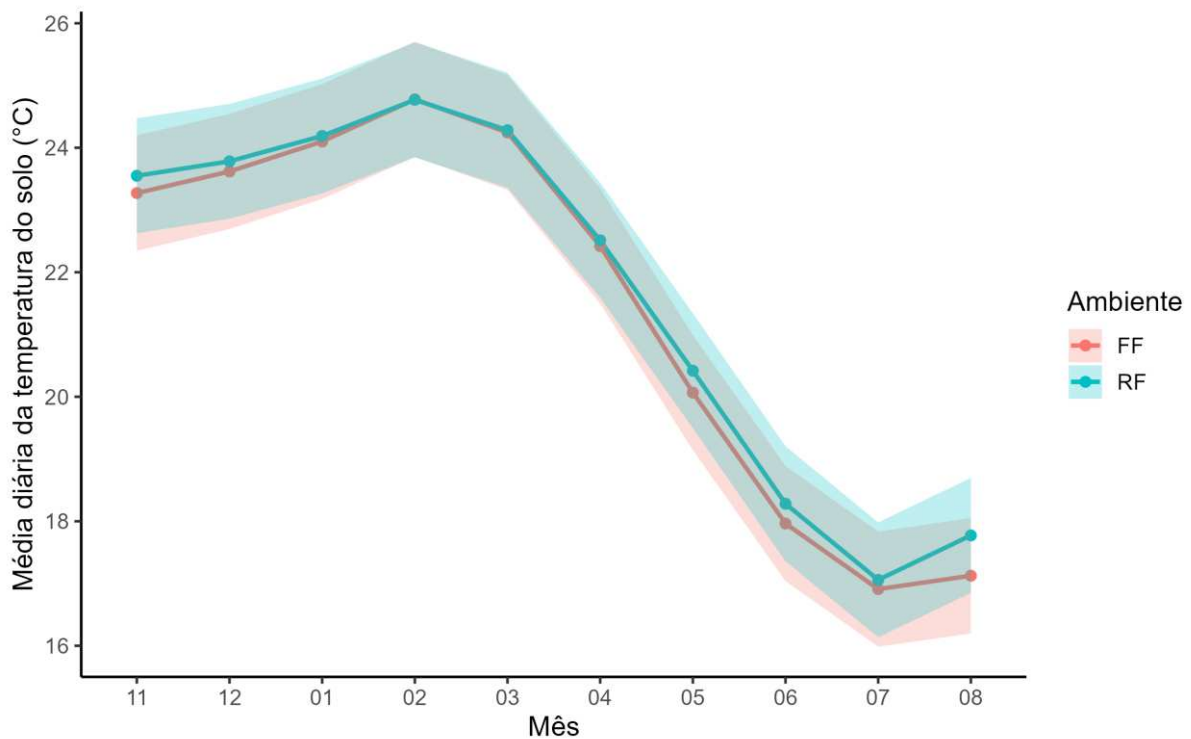


Figura 11 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da média diária da temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) ao longo dos meses (novembro de 2024 a agosto de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir do modelo linear misto (LMM, com distribuição Gaussiana). Pontos e linhas representam as médias estimadas por mês, com intervalos de confiança de 95%.

Umidade atmosférica

Como esperado, as variáveis atmosféricas sofreram grande alteração diária, tanto a umidade quanto a temperatura (que será tratada adiante), portanto foram realizados dois modelos para cada uma delas: um primeiro modelo aditivo misto generalizado (GAMM), ajustado com distribuição Beta e função de ligação logit, com um recorte de dez dias entre 1 e 10 de janeiro para verificar a variação horária; e um segundo modelo GLMM, também com distribuição Beta e função de ligação logit, para verificar os efeitos dos meses (sazonalidade), como foi feito para as outras variáveis anteriores.

O modelo GAMM indicou forte variação diurna da umidade atmosférica, com padrões significativamente distintos ao longo do dia em ambos os ambientes. Os efeitos não lineares da hora do dia foram altamente significativos tanto para o fragmento florestal quanto para o reflorestamento, evidenciando um padrão bem definido ao longo do ciclo diário (Figura 12). O

efeito do ambiente foi significativo, sugerindo que, em média, o reflorestamento apresentou menor umidade atmosférica ao longo do dia ($\beta = -0,082$, $p < 0,001$, na escala do logit).

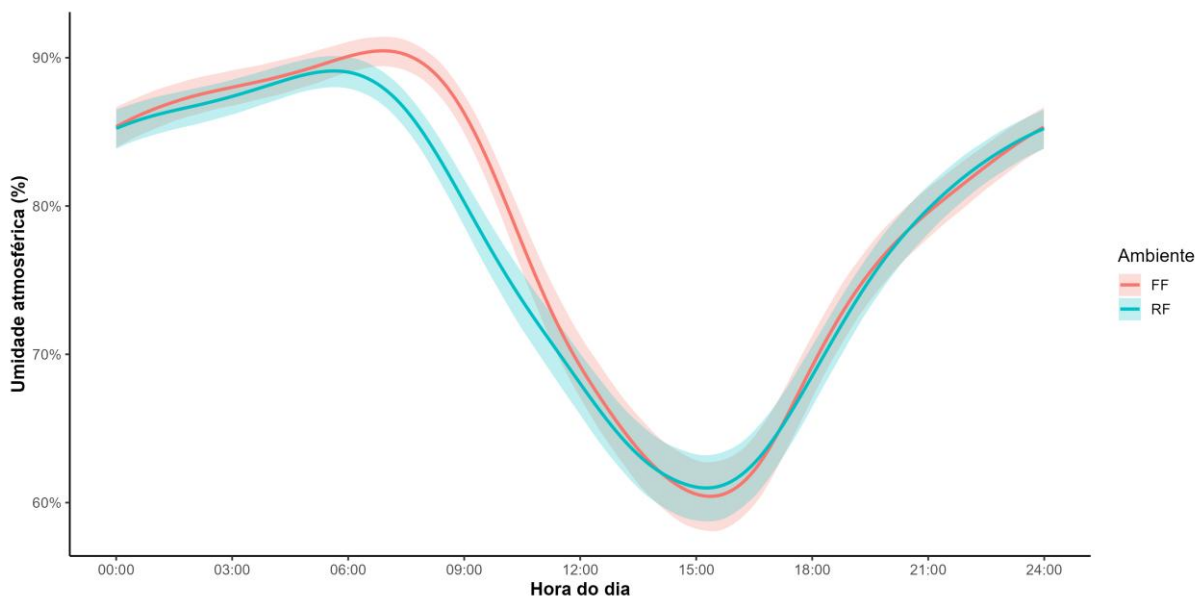


Figura 12 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da umidade atmosférica (%) ao longo das horas do dia (00:00–24:00), em dez dias (1 a 10 de janeiro de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir de um modelo aditivo misto generalizado (GAMM; distribuição Beta, link logit). Linhas representam as médias estimadas por hora, com intervalos de confiança de 95%.

Para o modelo sazonal da umidade atmosférica foi utilizado GLMM Beta (link logit) com efeitos fixos aditivos ambiente + mês e interceptos aleatórios para local e estação. Este modelo mostrou-se mais adequado que o modelo interativo (ambiente * mês), pois apresentou AIC mais baixo e a interação não indicou efeito significativo (Tabela 3,d). Por outro lado, o efeito do ambiente foi muito evidente, com RF menor que FF em 2,0 pontos percentuais de umidade atmosférica no mês de referência ($p < 0,001$) e em todos os meses avaliados (nov/2024 a ago/2025), com diferenças pequenas, mas consistentes (de 1 a 3 pontos percentuais).

Com relação à sazonalidade, a umidade atmosférica variou claramente ao longo do tempo, com destaque para os valores mais baixos no inverno, com o menor valor em agosto (71–74%); contudo, manteve-se acima de 80% em ambos os ambientes na maioria dos meses. A diferença das médias entre os ambientes foi pequena, porém consistentes, variando

aproximadamente entre 1 e 3 pontos percentuais, com maior contraste observado em agosto (Figura 13).

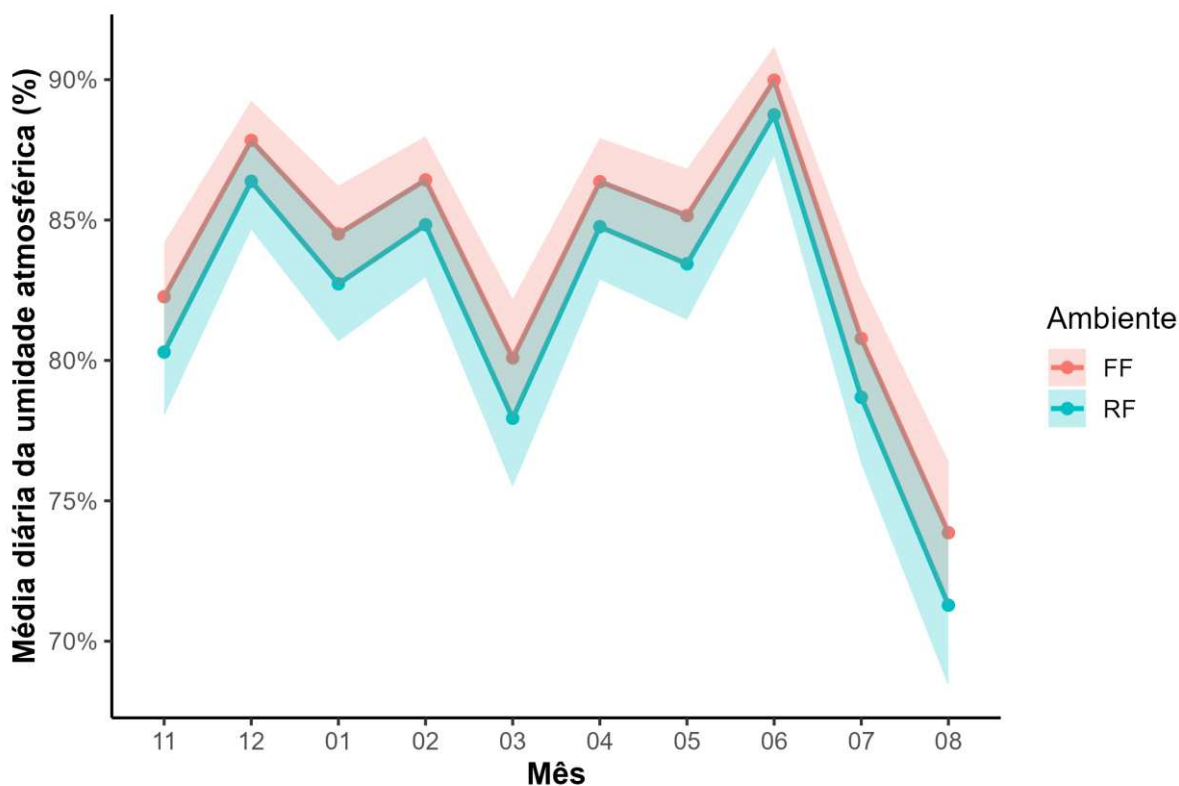


Figura 13 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da média diária da umidade atmosférica (%) ao longo dos meses (novembro de 2024 a agosto de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir do modelo misto generalizado (GLMM; distribuição Beta, link log). Pontos e linhas representam as médias estimadas por mês, com intervalos de confiança de 95%.

Temperatura atmosférica

Foram ajustados dois modelos: (i) um modelo aditivo generalizado (GAM), com distribuição Gaussiana, para avaliar a variação horária ao longo de um período de dez dias (1 a 10 de janeiro); e (ii) um modelo linear misto (LMM) para investigar a variação sazonal ao longo de todo o período amostral, uma vez que a variável apresentou distribuição aproximadamente normal.

O GAM indicou que o efeito da hora do dia diferiu significativamente entre os ambientes, com o reflorestamento (RF) apresentando, em média, temperatura 0,51 °C superior

na hora de referência ($p < 0,001$). Além disso, observou-se marcada variação diária, com valores mínimos por volta das 06:00 h, seguidos por aumento expressivo até o pico entre 15:00 h e 16:00 h. A temperatura foi consistentemente mais elevada no RF até o momento do pico e, a partir desse ponto, aproximou-se dos valores observados no FF (Figura 14).

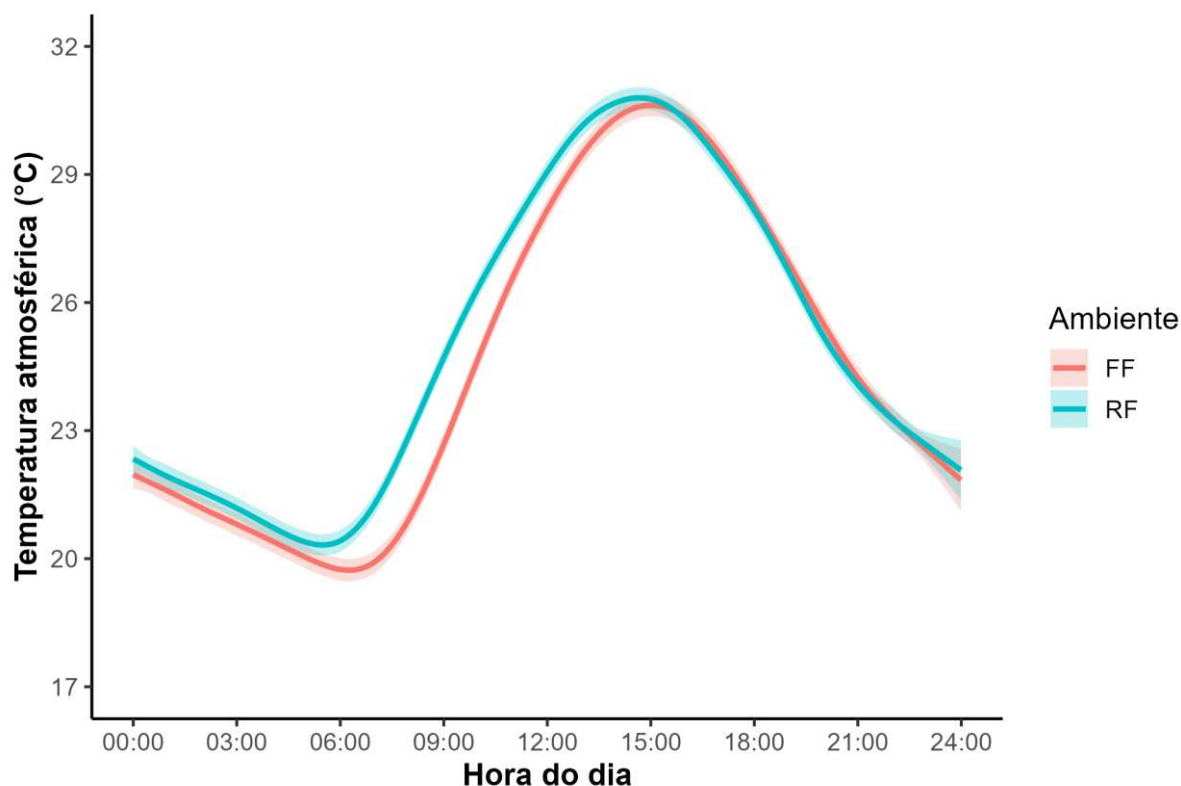


Figura 14 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da temperatura atmosférica ($^{\circ}\text{C}$) ao longo das horas do dia (00:00–24:00) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir de um modelo aditivo generalizado (GAMM; distribuição gaussiana). Linhas representam as médias estimadas por hora, com intervalos de confiança de 95%.

Para efeito sazonal foi considerada a média diária da temperatura atmosférica com modelo linear misto (LMM), fixos aditivos ambiente + mês e interceptos aleatórios para local e estação. Este modelo mostrou-se mais adequado que o modelo interativo (ambiente * mês), pois apresentou AIC mais baixo e a interação não indicou efeito significativo (tabela 3,e).

No mês de referência (nov/2024), no fragmento florestal, a média diária estimada da temperatura atmosférica foi de aproximadamente 24,04 $^{\circ}\text{C}$, e o efeito do ambiente foi altamente

significativo, uma vez que o reflorestamento apresentou temperatura média 0,58 °C mais alta que o fragmento ($p < 0,000,1$). Os efeitos da sazonalidade também foram significativos em quase todos os meses, indicando forte sazonalidade, com temperaturas evidentemente mais elevadas no verão (especialmente em fevereiro e março) e queda acentuada a partir de abril, atingindo os menores valores entre maio e agosto, com mínimo em julho ($p < 0,001$ para a maioria dos meses).

Quando comparados os dois ambientes, nota-se que o reflorestamento apresentou temperatura média estimada mais elevada em todos os meses, e essa diferença manteve-se relativamente constante durante todo o período. Com relação à sazonalidade, destacou-se o gradiente térmico típico entre verão e inverno (Figura 15). As médias indicaram temperaturas mais elevadas entre novembro e março, com destaque para fev/2025, quando os maiores valores foram registrados (FF: 24,60 °C, IC 95%: 23,50 – 25,70 °C; RF: 25,20 °C, IC 95%: 24,10 – 26,2 °C). A partir de abril, houve queda acentuada, com os menores valores ocorrendo em jul/2025 (FF: 15,60 °C, IC 95%: 14,50 – 16,60 °C; RF: 16,10 °C, IC 95%: 15,10 – 17,20 °C), que volta a recuperar a partir de agosto.

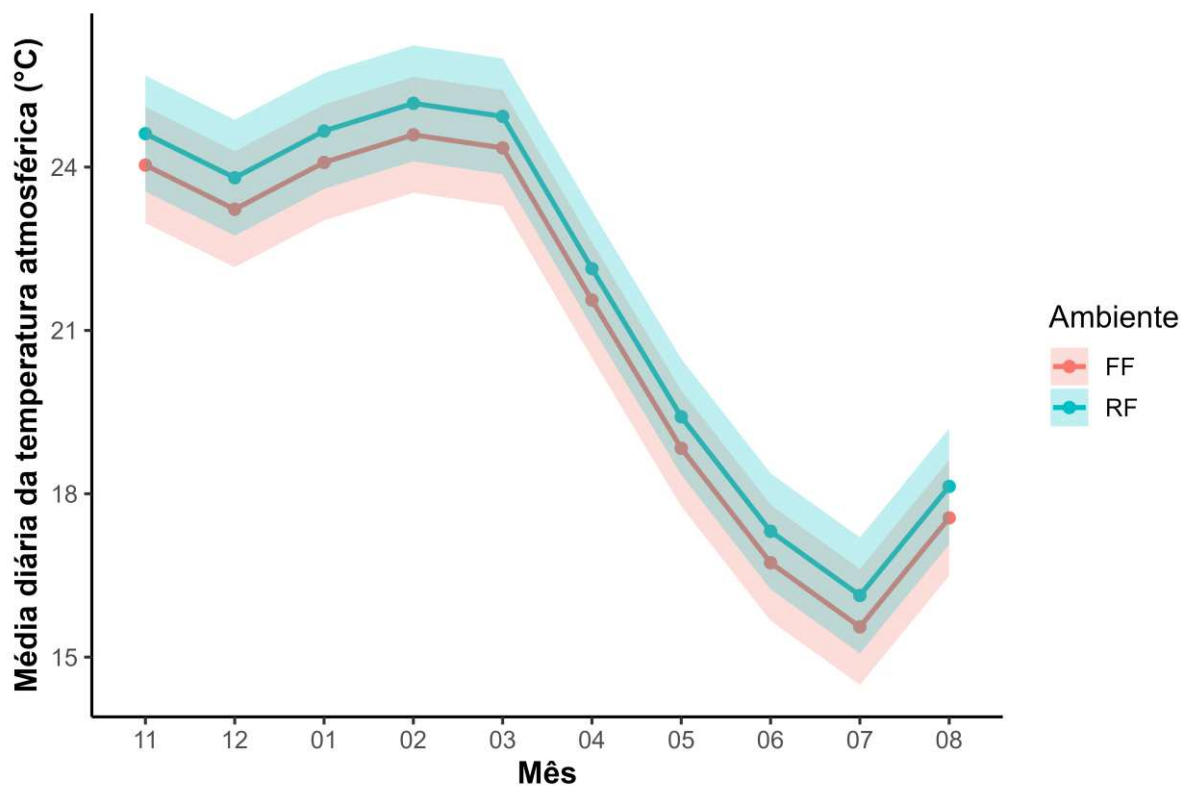


Figura 15 - Médias estimadas ($\pm$ IC 95%) da média diária da temperatura atmosférica (°C) ao longo dos meses (novembro de 2024 a agosto de 2025) e nos ambientes (fragmento de Floresta Estacional Semidecidual (FF) ou sítio em restauração (RF)), obtidas a partir do modelo linear misto (LMM; Gaussiana). Pontos e linhas representam as médias estimadas por mês, com intervalos de confiança de 95%.

Tabela 3 - Modelos lineares mistos (LMM) e modelos mistos lineares generalizados (GLMM) para cada variável microclimática analisada, e respectivos valores de k (número de parâmetros avaliados pelo modelo), AIC (Critério de Informação Akaike) e $\Delta AICc$ (Critério de Informação Akaike corrigido). Os modelos destacados em negrito foram selecionados pelo menor valor de AIC, para cada variável.

n°	Modelo	k	AIC	$\Delta AICc$
(a) Luminosidade – GLMM (Gamma, link = logit)				
a.1	ambiente + (1 Local) + (1 estac)	5	49653,68	1.515,06
a.2	ambiente + (1 Local) + (1 estac) + (1 mes)	6	48221,93	83,31
a.3	ambiente + mes + (1 Local) + (1 estac)	16	48184,96	46,34
a.4	ambiente * mes + (1 Local) + (1 estac)	27	48138,62	0
(b) Umidade do solo – GLMM (Beta, link = logit)				
b.1	ambiente + (1 Local) + (1 estac) + (1 mes)	6	-14760,37	88,33
b.2	ambiente + mes + (1 Local) + (1 estac)	14	-14800,61	48,09
b.3	ambiente * mes + (1 Local) + (1 estac)	23	-14848,70	0
(c) Temperatura do solo – LMM (Gaussiana)				
c.1	ambiente + (1 Local) + (1 estac)	5	25869.33	10.410,69
c.2	ambiente + mes + (1 Local) + (1 estac)	14	15473.56	14,92
c.3	ambiente * mes + (1 Local) + (1 estac)	23	15458.64	0
(d) Umidade atmosférica – GLMM (Beta, link = logit)				
d.1	ambiente * mes + (1 Local) + (1 estac)	23	-12150.79	7,73
d.2	ambiente + mes + (1 Local) + (1 estac)	14	-12158.52	0
(e) Temperatura atmosférica – LMM (Gaussiana)				
e.1	ambiente * mes + (1 Local) + (1 estac)	23	21743.55	9,04
e.2	ambiente + mes + (1 Local) + (1 estac)	14	21734.51	0

DISCUSSÃO

Diversos estudos têm caracterizado o microclima de ecossistemas florestais e o comparado a áreas abertas, evidenciando diferenças marcantes entre esses ambientes (PINTO *et al.*, 2010; GOTARDO *et al.*, 2019). Entretanto, ainda são poucas as pesquisas que comparam áreas florestais em restauração com florestas maduras, especialmente no contexto da Mata Atlântica, visando avaliar em que medida essas áreas recuperam condições microclimáticas semelhantes às de ecossistemas conservados.

De forma geral, os resultados deste estudo indicam diferenças significativas entre os ambientes, confirmando a hipótese inicial. As áreas de reflorestamento com mais de 20 anos apresentaram maior luminosidade, maior temperatura do ar e do solo, maior umidade do solo e menor umidade atmosférica em relação aos fragmentos de floresta estacional semidecidual. Além disso, a sazonalidade exerceu forte influência sobre as variáveis microclimáticas, modulando a magnitude dessas diferenças ao longo dos meses.

O microclima florestal é influenciado por diversos fatores estruturais e fisiológicos da vegetação, destacando-se o índice de área foliar e os processos de evapotranspiração (HARDWICK *et al.*, 2015; WANG *et al.*, 2022). Esses elementos contribuem, por exemplo, com a diminuição da temperatura e com o aumento da umidade. Nesse sentido, os padrões observados sugerem que, apesar do tempo de regeneração, os reflorestamentos ainda não apresentam estrutura semelhante à dos fragmentos florestais, o que se reflete diretamente nas condições microclimáticas.

Com relação ao contexto ecológico, os resultados indicam que há diferença no microclima entre os ambientes, mesmo após duas décadas do início do reflorestamento, de forma que estas áreas provavelmente não fornecem condições microclimáticas ideais para ocupação e reprodução de espécies mais sensíveis da fauna e da flora da Mata Atlântica da

floresta estacional semidecidual. Estudos específicos, como de germinação *in situ* de sementes ou ensaios ecofisiológicos com animais, podem indicar quais variáveis, e em que medida, afetam quais processos ecológicos.

Luminosidade

A maior luminosidade observada nos reflorestamentos ao longo de todos os meses provavelmente está associada a características estruturais da vegetação, como a cobertura de dossel, a dinâmica, a presença de clareiras e diferenças na composição de espécies. Além disso, a disponibilidade de luz variou sazonalmente, sendo mais contrastante entre os ambientes nos meses mais quentes, possivelmente em função da maior incidência solar.

Esses resultados indicam que os reflorestamentos apresentam menor cobertura de dossel em relação aos fragmentos florestais maduros, o que é consistente com estudos que demonstraram que formações com menor índice de área foliar (IAF) permitiram maior incidência de luz até o sub-bosque (PINTO *et al.*, 2010; GOTARDO *et al.*, 2019). Ambientes com maior IAF são capazes de interceptar grande parte da radiação incidente, bloqueando mais de 95% da luz visível (BONAN, 2008), o que contribui para a diminuição da temperatura e para a manutenção de condições microclimáticas mais estáveis (HARDWICK *et al.*, 2015).

Do ponto de vista ecológico, a maior disponibilidade de luz no interior dos reflorestamentos pode ter implicações importantes para a dinâmica da regeneração e para a trajetória sucessional dessas áreas. Ambientes mais iluminados tendem a favorecer espécies pioneiras e heliófitas, ao mesmo tempo em que estão associados a temperaturas mais altas e umidades mais baixas, que podem limitar o estabelecimento de espécies tolerantes à sombra, características de florestas mais maduras (DE PAUW *et al.*, 2022; ZHOU *et al.*, 2023). Com efeito, a maior incidência de radiação pode intensificar o estresse térmico e hídrico sobre plântulas, influenciando padrões de sobrevivência e crescimento (SANGSUPAN *et al.*, 2021).

Esse conjunto de fatores sugere que a persistência de elevados níveis de luminosidade pode retardar a convergência, em termos de espécies e grupos funcionais de plantas, dos reflorestamentos em direção aos fragmentos florestais.

Umidade do solo

A umidade do solo foi significativamente maior nos reflorestamentos em todos os meses avaliados; entretanto, a magnitude desse efeito variou sazonalmente. As maiores diferenças entre os ambientes ocorreram entre os meses de março e agosto, sendo a maior delas em agosto, meses com histórico de menor precipitação. Entre os meses de novembro e fevereiro, considerados de grande precipitação, as diferenças foram menores. Contudo, observou-se um aumento na umidade do solo no mês de junho (históricamente seco), o que foi resultado de chuvas naquele período.

A dinâmica da umidade do solo reflete o balanço entre entrada de água (precipitação e infiltração) e perdas (evaporação do solo e, principalmente, captura e transpiração pelas plantas), além de processos modulados pela estrutura da vegetação, como interceptação da chuva pelo dossel e sombreamento do solo.

Para esta variável, esperava-se maior umidade nos fragmentos florestais, algo inferível pelas temperaturas mais amenas e umidade relativa mais alta do ar nos fragmentos; contudo, observou-se o padrão oposto. Uma explicação plausível é que os fragmentos, por apresentarem maior biomassa e maior área foliar, possam sustentar maior evapotranspiração e, conseqüentemente, maior consumo de água do solo, reduzindo a umidade em comparação aos reflorestamentos (SU *et al.*, 2022; TITO *et al.*, 2022). Além disso, uma maior área foliar pode causar maior interceptação no fragmento e menos água chega ao solo (GOTARDO *et al.*, 2019). Além da maior interceptação e maior captura de água do solo pela vegetação, é importante destacar que nas florestas maduras a permeabilidade do solo deve ser maior, como efeito do

maior desenvolvimento da biota do solo e da maior colonização por raízes. Outro fator a ser considerado é a existência de compactação induzida pelo uso pretérito do solo nos sítios de restauração, mesmo mais de 20 anos após o plantio das mudas. No entanto, estas diferenças na permeabilidade precisam ser testadas diretamente.

Diversos estudos avaliaram os efeitos da restauração florestal sobre a umidade do solo, comparando áreas reflorestadas com campos abertos. Em alguns contextos, o avanço sucessional e o aumento da cobertura arbórea podem favorecer a infiltração, a estabilidade da umidade e a recuperação de funções hidrológicas do solo, resultando em maior disponibilidade hídrica (PERKINS *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2024). Entretanto, essa resposta não é universal: outros estudos indicam que o reflorestamento, especialmente por plantio artificial, pode reduzir a umidade do solo ao longo do perfil em função do aumento do consumo de água pela vegetação (LIANG *et al.*, 2022). Assim, nem sempre o aumento da biomassa florestal total se traduz em déficit hídrico; os efeitos do reflorestamento dependem do tipo de restauração, do estágio sucessional, do clima e das propriedades do solo, que determinam o balanço entre precipitação, infiltração e evapotranspiração.

Do ponto de vista ecológico, a maior umidade do solo observada nos reflorestamentos pode representar uma condição favorável para o estabelecimento, a sobrevivência e o crescimento inicial de plântulas, especialmente durante períodos de menor disponibilidade hídrica. A manutenção de níveis mais elevados e estáveis de umidade tende a reduzir o estresse hídrico, aumentando a resiliência da vegetação restaurada frente a variações sazonais e eventos de seca, conforme observado em outros estudos de restauração florestal (PERKINS *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2024). Por fim, é importante ressaltar que as medidas discutidas aqui estão limitadas à camada superficial (até 10cm de profundidade), com grande impacto para a germinação de sementes, para o crescimento inicial de plântulas e para a biota do solo, mas pouco informativo sobre a disponibilidade hídrica para plantas maiores e com raízes mais

profundas.

Temperatura do solo

Os valores de temperatura do solo foram, em geral, maiores nos reflorestamentos ao longo de todo o período. Entretanto, após o controle dos efeitos aleatórios dos locais e das estações amostrais, as diferenças entre reflorestamento e fragmento não foram significativas na maioria dos meses, com exceção de maio e agosto. Esses resultados indicam elevada similaridade entre os ambientes para essa variável, com apenas um leve incremento térmico nos reflorestamentos.

A sazonalidade foi evidente, com maiores valores durante o verão (novembro a fevereiro) e redução acentuada no inverno (junho e julho), seguida por aumento gradual a partir de agosto. Esse padrão foi semelhante nos dois ambientes, refletindo principalmente a influência das variações climáticas regionais.

A dinâmica da temperatura do solo é influenciada por múltiplos fatores, incluindo temperatura do ar, umidade do solo, luminosidade e topografia (SAVVA *et al.*, 2010; GRILLAKIS *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2020). No entanto, diversos estudos apontam a cobertura vegetal como um dos principais determinantes desse processo (BOND-LAMBERTY *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2012), uma vez que ela regula a distribuição da energia radiante entre o solo e a vegetação (WANG *et al.*, 2022). Assim, dosséis menos fechados permitem maior passagem de feixes de radiação solar, promovendo o aquecimento do solo, o que pode explicar as diferenças observadas entre os reflorestamentos, caracterizados por menor cobertura, e os fragmentos florestais, com dossel mais contínuo.

Do ponto de vista ecológico, a elevada similaridade na temperatura do solo entre reflorestamentos e fragmentos florestais sugere que, ao menos para essa variável, os ambientes em restauração já apresentam condições microclimáticas próximas às observadas em áreas mais

conservadas. A temperatura do solo constitui um fator crítico que regula processos físicos, biológicos e microbiológicos, além de influenciar processos hidrológicos e biogeoquímicos nos ecossistemas (BAI *et al.*, 2014; JUNGQVIST *et al.*, 2014). Variações sazonais e interanuais dessa variável afetam diretamente a respiração do solo, o armazenamento de matéria orgânica, a decomposição microbiana, o crescimento da vegetação e a produtividade florestal (ZHANG *et al.*, 2005). Nesse contexto, pequenos aumentos térmicos, como os observados nos reflorestamentos, podem intensificar a evaporação e interagir com a umidade do solo, potencializando o estresse hídrico durante períodos secos.

Assim, os resultados indicam que, embora a estrutura da vegetação ainda difira entre os ambientes, o microclima edáfico apresenta sinais de convergência funcional, o que pode favorecer a estabilidade ecológica e a progressão sucessional das áreas restauradas.

Umidade atmosférica

Os resultados do modelo horário indicaram valores mais elevados de umidade atmosférica nos fragmentos florestais, além de variação fortemente não linear ao longo do dia, com curvas horárias distintas entre os ambientes. De modo geral, observou-se um padrão diário bem definido, com valores mínimos por volta das 15h, período correspondente às maiores temperaturas, seguido por aumento progressivo durante a noite e a madrugada, atingindo máximos próximos às 7h da manhã.

No modelo sazonal, a umidade atmosférica também foi consistentemente maior nos fragmentos ao longo dos meses analisados. As maiores diferenças entre os ambientes ocorreram em novembro, março e agosto, sendo os dois primeiros meses caracterizados por elevadas temperaturas e precipitação, e o último por baixa pluviosidade associada ao aumento gradual da temperatura. Estudos indicam que fatores topográficos, como declividade e curvatura do terreno, podem influenciar a temperatura do ar e, conseqüentemente, a pressão de vapor e a

umidade relativa. Além disso, a estrutura do dossel exerce papel fundamental ao reduzir a incidência de vento e radiação, favorecendo a retenção de umidade no interior da floresta (HARDWICK *et al.*, 2015; JUCKER *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2022).

Diferentemente da luminosidade, da temperatura e da umidade do solo, as variáveis microclimáticas atmosféricas apresentam elevada variabilidade temporal, com mudanças rápidas ao longo do dia. Isso ocorre porque, além dos fatores estruturais, processos fisiológicos, como abertura estomática e transpiração, interagem continuamente com as condições atmosféricas, estabelecendo relações dinâmicas de feedback.

Nesse sentido, os padrões observados estão diretamente relacionados às variações na temperatura do ar, à incidência de radiação solar e à dinâmica da evapotranspiração, que dependem da estrutura e do funcionamento fisiológico da vegetação. Os fragmentos florestais, por apresentarem dossel mais contínuo e maior área foliar, possuem maior capacidade de atenuar a radiação e o vento, regular a temperatura e controlar as trocas de vapor, resultando em maior umidade atmosférica. Estudos demonstram que essas trocas são fortemente moduladas pelas resistências estomática e aerodinâmica, apresentando padrão diário bem definido e elevada dependência da radiação e da velocidade do vento (BEHERA *et al.*, 2023).

Contudo, Wang *et al.* (2022) identificaram que a restauração florestal pode promover o aumento da umidade do ecossistema e que, quanto maior a área em restauração e mais avançado o estágio sucessional, maior tende a ser o efeito de umidificação do ambiente, indicando que esse padrão pode se modificar ao longo do tempo.

Do ponto de vista ecológico, a maior umidade atmosférica nos fragmentos contribui para a redução do déficit de pressão de vapor, favorecendo o funcionamento estomático, o balanço hídrico das folhas e o desempenho fisiológico das plantas. Essas condições podem resultar em maior produtividade, crescimento e sucesso reprodutivo das espécies, além de aumentar a resiliência da vegetação frente a períodos de estresse hídrico. Assim, os resultados

sugerem que a manutenção de elevados níveis de umidade atmosférica constitui um componente importante da convergência funcional entre áreas em restauração e florestas maduras.

Temperatura atmosférica

Os modelos aditivos generalizados indicaram efeito significativo do ambiente sobre a temperatura do ar, com valores, em média, cerca de 0,5 °C mais elevados nos reflorestamentos. Além disso, observou-se um padrão diário fortemente não linear, com curvas horárias distintas entre os ambientes, refletindo diferenças na dinâmica de aquecimento e resfriamento ao longo do dia. A presença de efeitos espaciais significativos, ainda que de baixa magnitude, indica que esse padrão é consistente entre locais e estações amostrais.

A análise das curvas horárias mostrou que os reflorestamentos atingiram seus valores mínimos mais cedo, por volta das seis horas da manhã, iniciando o aquecimento logo em seguida. Nos fragmentos, as temperaturas mais baixas se mantiveram por mais tempo, com valores mínimos registrados entre sete e oito horas, seguidos por aquecimento gradual. Da mesma forma, os reflorestamentos atingiram os valores máximos mais precocemente e em níveis mais elevados. Em conjunto, esses padrões indicam menor capacidade de amortecimento térmico nos reflorestamentos, que permanecem mais expostos às variações radiativas e atmosféricas, enquanto os fragmentos mantêm um microclima mais estável.

O modelo linear misto sazonal também indicou diferença significativa entre os ambientes, com temperaturas, em média, cerca de 0,6 °C mais elevadas nos reflorestamentos no mês de referência e valores superiores ao longo de todos os meses analisados. A sazonalidade apresentou variação característica, com maiores temperaturas entre novembro e março, seguida por redução progressiva até junho e julho, que apresentaram as menores médias. Contudo, a magnitude das diferenças entre os ambientes não permaneceu constante ao longo do período,

sendo mais expressiva nos meses mais quentes e menos acentuada nos meses mais frios, o que indica novamente menor capacidade de amortecimento térmico nos reflorestamentos.

Diversos estudos relacionam a temperatura atmosférica à estrutura do dossel. Gotardo *et al.* (2019) verificaram que áreas abertas apresentam temperaturas substancialmente mais elevadas do que o interior de fragmentos de Mata Atlântica, destacando a importância da cobertura vegetal, especialmente durante as horas mais quentes do dia. Florestas com menor densidade de copa e menor índice de área foliar permitem maior incidência de radiação solar, promovendo o aquecimento do solo e, conseqüentemente, da atmosfera, resultando em valores máximos mais elevados. De modo geral, observa-se uma relação negativa entre a temperatura do ar e o índice de área foliar (HARDWICK *et al.*, 2015).

Outros estudos também ressaltam a influência da topografia sobre a temperatura do ar, uma vez que a inclinação e a orientação do terreno afetam a quantidade de radiação solar incidente (DE FRENNE *et al.*, 2021). No presente estudo, entretanto, os efeitos de local e estação apresentaram baixa magnitude, indicando que as variações topográficas exerceram influência limitada sobre essa variável.

A temperatura atmosférica exerce influência direta sobre os processos ecofisiológicos dos ecossistemas florestais. Embora essa relação seja complexa e dependente do contexto regional e da composição de espécies, temperaturas mais elevadas tendem a intensificar a evapotranspiração, promovendo ambientes mais secos e afetando processos como decomposição da matéria orgânica, respiração, fotossíntese e produção primária (TAN *et al.*, 2017; BEHERA *et al.*, 2023).

Por fim, assim como observado para a umidade atmosférica, estudos indicam que a restauração florestal pode contribuir para a redução da temperatura do ar, especialmente à medida que a área em restauração se amplia e o estágio sucessional avança (WANG *et al.*, 2022). Nesse sentido, os resultados sugerem que os reflorestamentos avaliados ainda se

encontram em processo de consolidação estrutural e funcional, não tendo atingido plenamente a capacidade de amortecimento térmico observada nos fragmentos florestais maduros.

Contexto Geral

A análise conjunta das cinco variáveis microclimáticas evidenciou forte integração entre os processos atmosféricos, edáficos e estruturais nos ambientes avaliados, bem como elevada coerência entre os padrões diários e sazonais. Em escala horária, observou-se uma relação inversa consistente entre temperatura e umidade atmosférica, com valores mais elevados de umidade durante a madrugada e início da manhã, quando as temperaturas são mais amenas, e redução progressiva ao longo do dia associada ao aumento térmico e à intensificação da evapotranspiração. Em escala sazonal, os períodos mais quentes foram caracterizados por maiores níveis de luminosidade e temperatura do solo, especialmente nos reflorestamentos, refletindo a maior exposição à radiação solar decorrente da menor cobertura do dossel. Por sua vez, a umidade do solo e a umidade atmosférica mostraram ser influenciadas por outros fatores, como por exemplo a precipitação e a capacidade de retenção de água do solo, evidenciando que a disponibilidade hídrica resulta da interação entre clima regional, estrutura da vegetação e processos ecofisiológicos.

Em conjunto, esses padrões indicam que os reflorestamentos apresentam maior incidência luminosa, maior aquecimento atmosférico e menor retenção de umidade atmosférica, enquanto os fragmentos florestais mantêm condições microclimáticas mais estáveis, com maior capacidade de amortecimento térmico e hídrico. Esses resultados sugerem que, embora haja sinais de convergência funcional das variáveis edáficas, os componentes atmosféricos do microclima, relacionados à maior luminosidade possivelmente decorrente de diferenças no dossel, ainda refletem diferenças estruturais relevantes.

Limitações e perspectivas

Os resultados deste estudo devem ser interpretados à luz de algumas limitações relacionadas à escala temporal, à disponibilidade de variáveis explicativas e a aspectos instrumentais. Em primeiro lugar, o intervalo analisado, embora abrangente em escala diária e sazonal, ainda representa uma janela relativamente curta para avaliar tendências interanuais e possíveis efeitos associados à variabilidade climática de longo prazo. A ampliação da série temporal permitirá testar com maior robustez a consistência dos padrões observados ao longo dos anos e sua relação com a progressão sucessional dos reflorestamentos.

Em segundo lugar, a ausência de variáveis complementares relacionadas aos mecanismos microclimáticos restringe a capacidade de atribuir causalidade aos padrões detectados. Medidas independentes de estrutura do dossel (por exemplo, cobertura e índice de área foliar), bem como estimativas do déficit de pressão de vapor, evapotranspiração, velocidade e direção do vento, permitiriam avaliar de forma mais direta o papel do amortecimento estrutural nas diferenças entre ambientes.

Por fim, ocorreram falhas pontuais de sensores que resultaram em pequenas lacunas temporais em parte da série, as quais foram solucionadas devido ao número de estações que serviram como repetições de dados e mantiveram a consistência das análises. Ainda assim, a continuidade do monitoramento no âmbito do PELD-MANP tende a ampliar e consolidar o banco de dados, possibilitando avaliações mais completas do microclima em reflorestamentos e fragmentos de Floresta Estacional Semidecidual, além de favorecer o uso dessas séries em investigações futuras sobre restauração ecológica e dinâmica microclimática na Mata Atlântica.

CONCLUSÃO

Este estudo evidenciou a relevância da restauração de ecossistemas degradados para a recuperação das condições microclimáticas, ao mesmo tempo em que reforçou a importância da conservação dos fragmentos florestais, que desempenham papel fundamental no amortecimento térmico, hídrico e atmosférico. Esses ambientes apresentam maior capacidade de estabilizar o microclima, contribuindo para a manutenção de condições mais favoráveis ao funcionamento dos ecossistemas.

Embora, à primeira vista, as diferenças entre os ambientes possam parecer discretas, as análises demonstraram padrões consistentes e estatisticamente significativos, com os reflorestamentos apresentando, em média, maior luminosidade, maior umidade e temperatura do solo, menor umidade atmosférica e maior temperatura do ar. Esses resultados indicam que, apesar dos avanços estruturais, os reflorestamentos ainda não atingiram plenamente a convergência microclimática com os fragmentos florestais maduros.

Os efeitos da sazonalidade foram marcantes, evidenciando variações expressivas ao longo do período de estudo, associadas às estações do ano bem definidas, que influenciaram simultaneamente as cinco variáveis analisadas. Além disso, as variações horárias ao longo do dia foram particularmente relevantes para as variáveis atmosféricas, apresentando padrões não lineares característicos, associados às interações entre radiação, temperatura e evapotranspiração.

Por fim, a escassez de estudos sobre microclima na Mata Atlântica limita comparações mais amplas com outros estudos, ressaltando a importância de iniciativas de monitoramento de longo prazo, como o Programa de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD). Compreender o microclima é fundamental para ampliar o conhecimento dos efeitos da restauração e fomentar estratégias de manejo, conservação e formulação de políticas públicas voltadas à proteção e recuperação da Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAI, Y.; SCOTT, T. A.; MIN, Q. Climate change implications of soil temperature in the Mojave Desert, USA. *Frontiers of Earth Science*, v. 8, n. 3, p. 302–308, 2014.
- BAKER, T. P. et al. Microclimate through space and time: microclimate variation at the edge regeneration forest over daily, yearly and decadal time scale. *Forest Ecology and Management*, v. 334, p. 174–184, 2014.
- BHERING, S. B. et al. Mapa de solos do Estado do Paraná. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007.
- BONAN, G. B. *Ecological climatology: concepts and applications*. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- BOND-LAMBERTY, B.; WANG, C. K.; GOWER, S. T. Spatiotemporal measurement and modeling of stand-level boreal forest soil temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 131, n. 1–2, p. 27–40, 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Manual operativo do Programa Integrado de Ecologia. Brasília, DF: CNPq, 1997.
- BRASIL. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Programa Integrado de Ecologia – PIE. Resolução Normativa n. 016/1998, de 17 de dezembro de 1998. Brasília, DF: CNPq, 1998.
- BRITO, M. A. et al. Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração – PELD/CNPq – desafios da gestão, avanços e perspectivas. *Oecologia Australis*, v. 24, n. 2, 2020.
- CHEN, J. et al. The impact of natural vegetation restoration on surface soil moisture of secondary forests and shrubs in the karst region of southwest China. *Hydrological Processes*, v. 38, n. 5, e15161, 2024. DOI: 10.1002/hyp.15161.

- CHEN, J. M.; BLACK, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, Oxford, v. 15, n. 4, p. 421–429, 1992.
- CURY, R. T. S. Limitações para a emergência e o estabelecimento de plântulas: remoção de sementes e microclima. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2009.
- DE FRENNE, P. et al. Forest microclimates and climate change: importance, drivers and future research agenda. *Global Change Biology*, v. 27, n. 11, p. 2279–2297, 2021.
- DE PAUW, K. et al. Light availability drives microclimate buffering in forest understories and shapes plant community composition. *New Phytologist*, v. 233, n. 6, p. 2376–2389, 2022.
- DEJONGE, K. C. et al. Evapotranspiration terminology and definitions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 151, n. 5, p. 06025003, 2025. DOI: 10.1061/JIDEDH.IRENG-10491.
- EWERS, R. M.; BANKS-LEITE, C. Fragmentation impairs the microclimate buffering effect of tropical forests. *PLOS ONE*, v. 8, n. 3, 2013.
- FERRACIN, T. P. et al. Comparação de parâmetros bióticos e abióticos entre fragmento de floresta secundária nativa e um reflorestamento de *Pinus taeda* L. *Semina: Ciências Biológicas e da Saúde*, v. 31, n. 2, 2010. DOI: 10.5433/1679-0367.2010v31n2p179.
- GEIGER, R.; ARON, R. H.; TODHUNTER, P. *The climate near the ground*. 5. ed. Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 1995. DOI: 10.1007/978-3-322-86582-3.
- GOTARDO, R. et al. Comparação entre variáveis microclimáticas de local aberto e florestal em um bioma da Mata Atlântica, sul do Brasil. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 3, 2019. DOI: 10.5902/1980509834832.
- GRILLAKIS, M. G. et al. Climate-induced shifts in global soil temperature regimes. *Soil Science*, v. 181, n. 6, p. 264–272, 2016.

- HARDWICK, S. R. et al. The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 201, p. 187–195, 2015. DOI: 10.1016/j.agrformet.2014.11.010.
- HARTIG, F. DHARMA: residual diagnostics for hierarchical (multi-level/mixed) regression models. Versão 0.4.6. [S.l.]: R Foundation for Statistical Computing, 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>. Acesso em: 18 maio 2026.
- HYLANDER, K. et al. Climate adaptation of biodiversity conservation in managed forest landscapes. *Conservation Biology*, v. 36, n. 3, p. e13847, 2022.
- IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- JUCKER, T. et al. Canopy structure and topography jointly constrain the microclimate of human-modified tropical landscapes. *Global Change Biology*, v. 24, n. 11, p. 5243–5258, 2018.
- JUNGQVIST, G. et al. Effect of climate change on soil temperature in Swedish boreal forests. *PLoS ONE*, v. 9, n. 3, e93957, 2014.
- KAGEYAMA, P. Y.; GANDARA, F. B.; OLIVEIRA, R. E. Biodiversidade e restauração da floresta tropical. In: *Restauração ecológica de ecossistemas naturais*. São Paulo: [s.n.], 2008. p. 340.
- KEMPPINEN, J. et al. Microclimate, an important part of ecology and biogeography. *Global Ecology and Biogeography*, v. 33, n. 6, p. e13834, 2024.
- LIANG, H. et al. Afforestation may accelerate the depletion of deep soil moisture on the Loess Plateau: evidence from a meta-analysis. *Land Degradation & Development*, v. 33, n. 18, p. 3829–3840, 2022. DOI: 10.1002/ldr.4426.

- LIEBSCH, D.; MARQUES, M. C. M.; GOLDENBERG, R. How long does the Atlantic Rain Forest take to recover after a disturbance? Changes in species composition and ecological features during secondary succession. *Biological Conservation*, v. 141, p. 1717–1725, 2008.
- LIU, Y. et al. Investigation of the variability of near-surface temperature anomaly and its causes over the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 125, n. 10, e2019JD031723, 2020.
- MACLEAN, I. M. D. et al. On the measurement of microclimate. *Methods in Ecology and Evolution*, v. 12, n. 8, p. 1397–1410, 2021.
- MANTOANI, M.; TOREZAN, J. M. D. Regeneration response of Brazilian Atlantic Forest woody species to four years of *Megathyrus maximus* removal. *Forest Ecology and Management*, v. 359, p. 141–146, 2016.
- MENDONÇA, F. A.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. Dinâmica atmosférica e tipos climáticos predominantes da bacia do Rio Tibagi. In: MEDRI, M. E. et al. (org.). *A bacia do rio Tibagi*. Londrina: Edição dos Editores, 2002. p. 63–66.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- MEYER, C. L.; SISK, T. D.; COVINGTON, W. W. Microclimatic changes induced by ecological restoration of ponderosa pine forests in northern Arizona. *Restoration Ecology*, v. 9, n. 4, p. 443–452, 2001.
- MICKLEY, J. G. et al. Measuring microenvironments for global change: DIY environmental microcontroller units (EMUs). *Methods in Ecology and Evolution*, v. 10, n. 4, p. 578–584, 2019.
- MOTA, M. C.; TOREZAN, J. M. D. Efeitos da largura da mata ciliar em restauração sobre a comunidade vegetal. 2013. Trabalho acadêmico não publicado.

- PERKINS, K. S. et al. Assessing effects of native forest restoration on soil moisture dynamics and potential aquifer recharge, Auwahi, Maui. *Ecohydrology*, v. 7, n. 5, p. 1437–1451, 2014. DOI: 10.1002/eco.1469.
- PINTO, S. R. R. et al. Landscape attributes drive complex spatial microclimate configuration of Brazilian Atlantic forest fragments. *Tropical Conservation Science*, v. 3, n. 4, p. 389–402, 2010.
- R CORE TEAM. R: a language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 18 maio 2026.
- ROSENBERG, N. J.; BLAD, B. L.; VERMA, S. B. *Microclimate: the biological environment*. New York: John Wiley & Sons, 1983.
- SANGSUPAN, H. A. et al. Effects of canopy openness on seedling survival and growth in tropical forest restoration. *Forest Ecology and Management*, v. 485, p. 118244, 2021.
- SAVVA, Y. et al. Effects of land use and vegetation cover on soil temperature in an urban ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, v. 74, n. 2, p. 469–480, 2010.
- SIVISACA, D. C. L. et al. Atlantic Forest regeneration dynamics following human disturbance cessation in Brazil. *Environments*, v. 11, n. 11, p. 243, 2024.
- SU, B.; SU, Z.; SHANGGUAN, Z. Trade-off analyses of plant biomass and soil moisture relations on the Loess Plateau. *Catena*, v. 197, art. 104946, 2021. DOI: 10.1016/j.catena.2021.104946.
- TAN, Z.-H. et al. Optimum air temperature for tropical forest photosynthesis: mechanisms involved and implications for climate warming. *Environmental Research Letters*, v. 12, n. 5, art. 054022, 2017.

- TITO, R. et al. Secondary forests in Peru: differential provision of ecosystem services compared to other post-deforestation forest transitions. *Ecology and Society*, v. 27, n. 3, art. 12, 2022. DOI: 10.5751/ES-13446-270312.
- TOREZAN, J. M. D.; MARQUES, F. C. Amostragem e monitoramento de fauna e flora na Floresta Estacional. In: *Floresta estacional*. Londrina: Editora da Universidade Estadual de Londrina, 2019. cap. 9, p. 77–82.
- WANG, C. et al. Effects of vegetation restoration on local microclimate on the Loess Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, v. 32, n. 2, p. 291–316, 2022.
- WANG, G. X. et al. The variability of soil thermal and hydrological dynamics with vegetation cover in a permafrost region. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 162, p. 44–57, 2012.
- ZELLWEGER, F. et al. Advances in microclimate ecology arising from remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution*, v. 34, n. 4, p. 327–341, 2019.
- ZHANG, Y. et al. Soil temperature in Canada during the twentieth century: complex responses to atmospheric climate change. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 110, n. D3, 2005.
- ZHOU, L. et al. Canopy structure affects light transmission and regeneration trajectories in subtropical secondary forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 6, art. 1088291, 2023.