Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

ANÁLISE DO EFEITO DE AMORTECIMENTO DO MICROCLIMA DA FLORESTA DE SUB-BOSQUE DA RESERVA FLORESTAL ADOLPHO DUCKE NA AMAZÔNIA CENTRAL

Analysis of the mitigating effect of the microclimate of the understory forest of the adolpho ducke forest reserve in central amazonia

Análisis del efecto de amortiguamiento del microclima del sotobosque en la reserva adolpho ducke, amazonía central

Keully Melo de Souza
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia -INPA
keullymello@gmail.com

Luiz Antonio Candido
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia -INPA
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia -INPA

Polari Batista Corrêa
Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ)
polaribc@gmail.com

Maria Juliana de Melo Monte
Laboratório de Ciclos Biogeoquímicos – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
mjmm.monte@gmail.com

Gleice Guerreiro Temoteo
Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia -INPA
gleiceguerreiro@gmail.com

Regison da Costa de Oliveira
Laboratório de Manejo Florestal, Instituto Nacional de pesquisas da Amazônia-INPA
regison.oliveira@gmail.com

Willian Miguel Pereira Ramos
Universidade do Estado do Amazonas
wramos@uea.edu.br

Resumo: A cobertura vegetal desempenha um papel fundamental na modulação do microclima e na regulação dos processos hidrológicos, particularmente em ecossistemas sensíveis como a floresta amazônica, o que contribui para a conservação da biodiversidade, manutenção da qualidade do solo e redução dos impactos das mudanças climáticas. Nesse contexto, foi realizada uma pesquisa na Reserva Florestal Adolpho Ducke, em Manaus-AM, entre dezembro de 2020 e junho de 2021, cujo objetivo foi avaliar a interação entre a estrutura vegetal e o microclima na dinâmica da umidade do solo superficial, comparando áreas de sub-bosque e clareira. O estudo também aponta a mensuração da capacidade do ecossistema florestal de amortecer variações climáticas e sua relevância nos processos hidrológicos da região, cuja vulnerabilidade às mudanças climáticas é crescente. Além disso, foram realizadas medições de radiação solar incidente, temperatura e umidade relativa do ar, umidade do solo e precipitação. Os resultados indicaram uma perda significativa por interceptação, estimada em 46,79% na área de sub-bosque. A cobertura vegetal bloqueou cerca de 94,85% da radiação solar, resultando em um microclima mais ameno, com temperaturas diárias até 4,0 °C mais baixas e umidade relativa 15,0% superior no sub-bosque em comparação à clareira. Além disso, o solo do sub-bosque manteve-se mais úmido em dias secos, com déficit de pressão de vapor estável. Esses achados reforçam a importância da cobertura vegetal na modulação do microclima local, essencial para a manutenção da umidade do solo e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na floresta amazônica. Nesse sentido, o monitoramento dessas variáveis é fundamental para a compreensão dos impactos das mudanças no uso da terra e no clima global, fornecendo subsídios para políticas de conservação e manejo sustentável da Amazônia.

Palavras-chave: Floresta Tropical. Urbanização. Microclima. Monitoramento Ambiental.

Abstract: Vegetation cover plays a fundamental role in modulating the microclimate and regulating hydrological processes, particularly in sensitive ecosystems such as the Amazon rainforest. This research was conducted in the Adolpho Ducke Forest Reserve, in Manaus, Amazonas, between December 2020 and June 2021, with the aim of evaluating the interaction between vegetation structure and microclimate in the dynamics of surface soil moisture, comparing areas of understory and clearings. The study also aims to measure the capacity of the forest ecosystem to buffer climate variations and its relevance to hydrological processes in the region, which is increasingly vulnerable to climate change. Measurements of incident solar radiation, air temperature and relative humidity, soil moisture, and precipitation were taken. The results indicated a significant loss due to interception, estimated at 46.79% in the understory area. The vegetation cover blocked about 94.85% of solar radiation, resulting in a milder microclimate, with daily temperatures up to 4.0 °C lower and relative humidity 15.0% higher in the understory compared to the clearing. In addition, the understory soil remained moister on dry days, with stable vapor pressure deficit. These findings reinforce the importance of vegetation cover in modulating the local microclimate, which is essential for maintaining soil moisture and mitigating the effects of climate change in the Amazon rainforest. Monitoring these variables is critical for understanding the impacts of land use changes and global climate, providing input for conservation and sustainable management policies in the Amazon.

Keywords: Tropical forest, urbanization, microclimate, environmental monitoring.

Resumen: La cobertura vegetal desempeña un papel fundamental en la modulación del microclima y en la regulación de los procesos hidrológicos, particularmente en ecosistemas sensibles como la selva amazónica. Esta investigación, realizada en la Reserva Forestal Adolpho Ducke, en Manaos-AM, entre diciembre de 2020 y junio de 2021, tuvo como objetivo evaluar la interacción entre la estructura vegetal y el microclima en la dinámica de la humedad superficial del suelo, comparando áreas de sotobosque y claros. El estudio también busca medir la capacidad del ecosistema forestal para amortiguar variaciones climáticas y su relevancia en los procesos hidrológicos de la región, cuya vulnerabilidad al cambio climático es cada vez mayor. Se realizaron mediciones de radiación solar incidente, temperatura y humedad relativa del aire, humedad del suelo y precipitación. Los resultados

indicaron una pérdida significativa por interceptación, estimada en un 46,79% en el área de sotobosque. La cobertura vegetal bloqueó aproximadamente el 94,85% de la radiación solar, resultando en un microclima más templado, con temperaturas diarias hasta 4,0 °C más bajas y una humedad relativa 15,0% más alta en el sotobosque en comparación con el claro. Además, el suelo del sotobosque se mantuvo más húmedo en días secos, con un déficit de presión de vapor estable. Estos hallazgos refuerzan la importancia de la cobertura vegetal en la modulación del microclima local, esencial para el mantenimiento de la humedad del suelo y la mitigación de los efectos del cambio climático en la selva amazónica. El monitoreo de estas variables es fundamental para comprender los impactos de los cambios en el uso del suelo y en el clima global, proporcionando insumos para políticas de conservación y gestión sostenible de la Amazonía.

Palabras clave: Selva tropical, urbanización, microclima, monitoreo ambiental.

Submetido em: 08/02/2025
Aceito para publicação em: 20/08/2025
Publicado em: 16/09/2025

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é reconhecida como o maior remanescente de florestas tropicais do mundo, desempenha um papel fundamental nos processos climáticos, além de atuar como um regulador nas trocas de energia, umidade e massa entre a superfície terrestre e a atmosfera (Negrón-Juárez *et al*., 2018; Rocha *et al*., 2017). De igual modo, representa cerca de 53% das florestas tropicais globais, é caracterizada por sua alta disponibilidade hídrica, a qual resulta da interação entre o transporte de vapor d'água de origem oceânica, quanto da evapotranspiração produzida pela própria floresta (Satyamurty *et al.*, 2013; Salati e Nobre, 1991).

No entanto, a crescente degradação ambiental, impulsionada pelo desmatamento e alterações no uso da terra, tem comprometido a integridade desses ecossistemas. Estudos observacionais e de modelagem sugerem que até 55% da floresta amazônica poderá desaparecer até 2050 (Soares-Filho *et al*., 2006; Nepstad *et al*., 2008), trazendo consigo consequências significativas para o clima regional e global, ocasionando um aumento de 0,6 a 2,0 °C na temperatura do ar e uma diminuição de 20 a 30% na taxa de precipitação e evapotranspiração, provocando estações secas mais prolongadas (Nobre *et al*., 1991; Fisch *et al.,* 1997; Betts *et al.,* 1997; Betts, 2000; Chase *et al.,*2000; Zão *et al.,* 2001; Ghimire *et al.,* 2021). Essas mudanças, combinadas aos fenômenos atmosféricos de grande escala, como o El Niño e La Niña, criam um mosaico de impactos que afetam tanto o clima regional quanto global (Kalnay e Cai, 2003; Laurance *et al*., 1998; Oliveira *et al*., 2008; Sánchez-Azofeifa *et al*., 2003).

Dentro desse contexto, o microclima das florestas tropicais, especialmente nas bordas de fragmentos e clareiras, destaca-se como um indicador sensível das alterações antrópicas. Nessas áreas de borda, a maior exposição ao vento, à radiação solar e às temperaturas elevadas criam condições microclimáticas distintas daquelas observadas no interior da floresta. Tais mudanças afetam diretamente a umidade do solo e exercem influência sobre a biodiversidade local (Lenoir *et al.,* 2017; Laurance *et al*., 1998; Hofmeister *et al*., 2019). A capacidade da floresta de amortecer as variações climáticas é fortemente influenciada por fatores como a densidade do dossel, o índice de área foliar e as interações entre radiação solar e fluxo de calor (Hardwick *et al*., 2015; Miller *et al*., 2021). Já no sub-bosque, essas características criam um ambiente mais estável, com menor variabilidade de temperatura e

maior retenção de umidade em comparação com áreas abertas (Frenne *et al*., 2019; Whitmore, 1978).

Embora avanços tecnológicos em sensoriamento remoto e registradores de microclima tenham permitido maior precisão na quantificação dessas variáveis, a maioria dos dispositivos disponíveis concentram-se na temperatura do ar, negligenciando variáveis como a umidade do solo (Bramer *et al*., 2018; Blonder *et al*., 2018), por sua vez, é um propulsor essencial dos processos ecológicos, hidrológicos e climáticos, sendo influenciada por múltiplas variáveis, como a topografia, características do solo, cobertura vegetal e padrões de precipitação (Porporato *et al*., 2002; Gaur e Mohanty, 2013).

Diante disso, este estudo busca explorar as interações entre o microclima do sub-bosque e a variabilidade da umidade do solo e outras variáveis como a temperatura e umidade relativa do ar, precipitação e déficit de pressão de vapor em paisagens tropicais. O foco de tal estudo está em áreas, os quais apresentam diferentes níveis de distúrbios, neste caso, as clareiras e sub-bosque. O objetivo é compreender como a estrutura florestal modula as condições microclimáticas e os fluxos de energia e umidade, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos das mudanças climáticas e do uso do solo na Amazônia.

2. METODOLOGIA

2.1. Localização e Descrição da Área de Estudo

2.1.1. Sítio Experimental

A área de estudo está situada na Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD), localizada no km 26 da Estrada Manaus-Itacoatiara na rodovia AM-010. O clima é classificado como tropical úmido, a temperatura média anual é 26,7 °C, umidade relativa varia de 75 a 86% e média pluviométrica anual é 2300 mm (Marques Filho e Dallarosa, 2000; Oliveira *et al.,* 2008). A região apresenta grande sazonalidade pluviométrica, a estação chuvosa abrange os meses de dezembro-abril e a estação seca os meses de junho-outubro. No mês de maio ocorre o período de transição da estação chuvosa para seca, em novembro ocorre a transição da estação seca para a chuvosa (Macedo, 2012).

A vegetação apresenta estrutura de floresta primária não perturbada, com uma diversidade de 2079 espécies registradas e organizadas em comunidades vegetais de classes

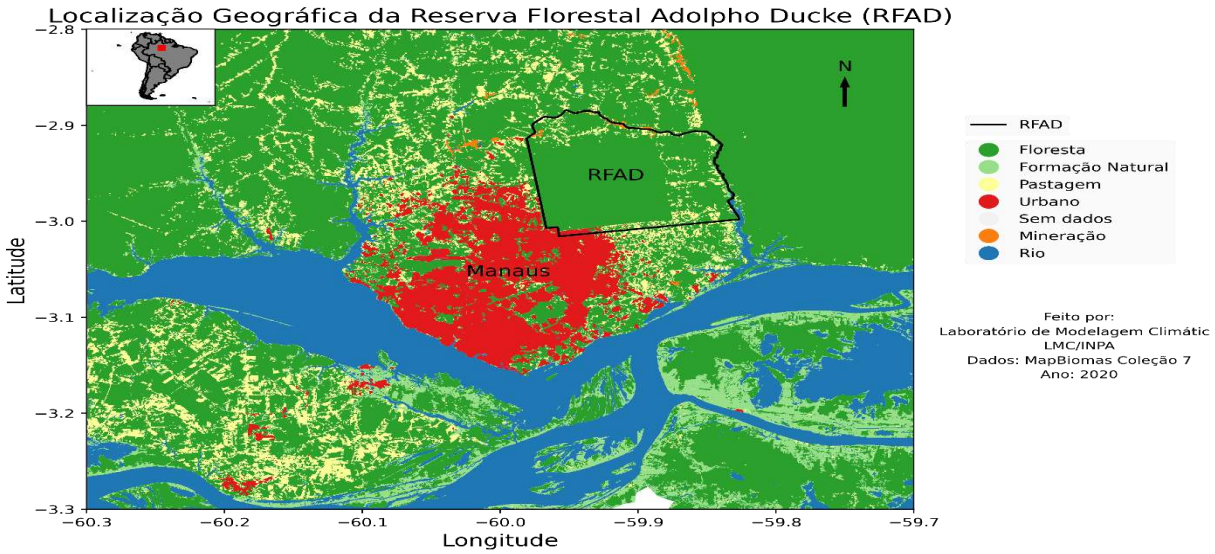
lenhosas, arbustivas e herbáceas (Marques Filho e Dallarosa, 2000). A composição florística predominante são as leguminosas, no sub-bosque a vegetação preeminente são as palmeiras acaules. As árvores possuem uma altura média de 35 m, com espécies emergentes podendo alcançar até 40 m (Hopkins, 2005). O solo é do tipo Latossolo Amarelo distrófico, caracterizado pela baixa fertilidade natural, altamente interperizado, de coloração amarelada, comum nas regiões tropicais como a Amazônia e Cerrado (Chauvel *et al.,*1987).

O relevo é suavemente ondulado, apresentando nas sequências topográficas platô, vertente e baixio. O platô está localizado na área mais alta e plana da RFAD, onde existe a predominância da fração argila, com valores médios de 85%, somando-se 10% de silte e 5% da fração de areia (Neta e Nishiwaki, 2018; Toledo, 2009; Machado e Pacheco, 2010).

A coleta de dados ocorreu de dezembro de 2020 a junho de 2021, abrangendo o período da estação chuvosa predominante na região amazônica e a transição para a estação seca. Essa escolha permitiu investigar a influência sazonal nas variáveis microclimáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar incidente e umidade do solo) em áreas de clareira e sub-bosque. A estação chuvosa é caracterizada por altos volumes de precipitação e maior frequência de dias chuvosos, proporcionando um cenário ideal para avaliar a capacidade de retenção hídrica e as dinâmicas de amortecimento do microclima pelas áreas florestadas.

O período de transição para a estação seca, também foi analisado, a fim de observar mudanças graduais nas condições climáticas e suas implicações no balanço hídrico. Embora o período de coleta tenha capturado variações sazonais importantes, a ausência de dados durante a estação seca completa (junho a outubro) pode limitar a extrapolação dos resultados para esse período. Estudos de longo prazo, incluindo todos os ciclos sazonais, seriam necessários para uma compreensão mais abrangente das dinâmicas microclimáticas ao longo do ano. Além disso, eventos climáticos extremos ou anomalias, como o La Niña, podem ter influenciado os dados coletados, destacando a necessidade de cautela ao generalizar os resultados para anos típicos.

Figura 1 - Localização do sítio experimental na Reserva Florestal Adolpho Ducke.



Fonte: Elaborado pelo Laboratório de Modelagem Climática (LMC/INPA). Dados: MapBiomas, coleção 7. Ano 2020.

Para o desenvolvimento da pesquisa foram selecionados os seguintes ambientes: área da clareira e o sub-bosque florestal. As duas áreas estão próximas uma da outra apresentando características e dimensões diferentes. O conjunto de dados utilizados na área da clareira é proveniente da estação climatológica da RFAD, instalada no centro da clareira, a torre de alumínio possui 3 m de alturas com sensores instalados a 1,5 m do solo. No interior da floresta foi selecionada uma subparcela que abriga uma diversidade de árvores com cobertura vegetal homogênea. Nesta subparcela, foi instalada em novembro de 2020 uma estação climatológica com altura de 2 m e sensores instalados a um 1,5 m de altura do solo.

2.2. Variáveis Micrometeorológicas

2.2.1. Área de Clareira

Os dados micrometeorológicos são provenientes da estação climatológica da RFAD e incluem temperatura do ar (T) e umidade relativa (UR) medidas com termohigrômetro Onset HOBO® U23-001; radiação solar global (Rg) com piranômetro Onset HOBO® S-LIB-M003; umidade do solo (WS) com sensor TDR HOBO® CS615; e precipitação (Prec) com pluviômetro Onset HOBO® RG3-M. As medições foram registradas por um datalogger CR23x, com leituras a cada 10 s e armazenamento de médias a cada 10 min. Todos os sensores foram calibrados conforme as especificações do fabricante, garantindo precisão dos dados.

2.2.2. Área de Floresta

No interior da floresta, as variáveis medidas foram T, UR, Rg, WS e Prec. Os sensores nesta área foram do mesmo tipo e modelo daqueles utilizados na área de clareira. A precipitação interna foi monitorada por um sistema de calhas coletoras, interligadas a um pluviômetro HOBO RG3-M Rain Gauge/ONSET, com resolução de 0,2 mm, com área de capitação de 181,46 cm².

O sistema é composto por quatro calhas de PVC (150 mm de diâmetro e 3 m de comprimento), cada calha possui três aberturas superiores de 70 x 6,5 cm, instaladas a 1 m do solo. As calhas conduzem a água a uma caixa canalizadora conectada ao pluviômetro com inclinações ajustadas de acordo com a distância e o espaçamento entre as árvores. O sistema inclui ainda um coletor para captar o escoamento pelos troncos.

Os coletores foram instalados em quatro árvores com diâmetro superior a 10 cm, utilizando anéis de PVC reforçados com borracha e fita adesiva para direcionar a água aos coletores principais. A resolução da báscula do pluviômetro foi ajustada de acordo com a nova área de captação, resultando na escala de registro de 0,0059825 mm. A área total de captação do sistema é de 6067,65 cm². As informações meteorológicas da estação foram registradas por um datalogger CR510x (Campbell Scientific®), que coletava dados a 10 Hz e armazenava médias a cada 10 minutos.

A partição da precipitação foi realizada com base na seleção de eventos de chuva, classificados segundo intensidade e duração. Para avaliar a contribuição da precipitação efetiva em relação ao fluxo total, determinou-se a razão entre a precipitação efetiva e a precipitação total acima do dossel. A estimativa da interceptação (I), foi obtida a partir da seguinte equação:

$$(1) \quad I = P_t - P_i$$

Em que, I é a interceptação em (%), P_t *é* a precipitação total em (mm) e P_i é a precipitação interna (mm).

O déficit de pressão de vapor (DPV) para as duas estações automáticas foi estimado pela metodologia proposta pela FAO 56 conforme as equações (2, 3 e 4).

(2) $$e_{a} = \frac{UR}{100} X\ e_s$$

Em que, e_a é a pressão atual de vapor (hPa), UR é a umidade relativa do ar observada pela estação (%), e e_s é a pressão de saturação de vapor (hPa).

(3) $$e_{s=} \frac{e\,(T_x)+e(T_n)}{2}$$

Onde, $e(T_x)$ é a pressão de vapor da temperatura máxima e $e(T_n)$ é a pressão de vapor da temperatura mínima.

(4) $$DPV = e_s - e_a$$

A distribuição vertical de cobertura foliar da área foi estimada por (Marque Filho e Dallarosa, 2000). As análises granulométricas da área de estudo foram realizadas por Mertens (2004), além dos resultados, referentes a um total de 23 atributos do solo, os quais foram registrados a partir de amostras de solo nas profundidades de 0-5cm, retiradas a cada 50 m ao longo da linha central da parcela.

2.3. Tratamento dos Dados e Análises

Para a análise dos dados, foi utilizada a linguagem Python para calcular as médias temporais das variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar incidente e umidade do solo), calculadas com base em intervalos de 10 minutos, para representar as condições médias de cada área (clareira e sub-bosque). Adicionalmente, foram realizadas análises pareadas entre os dados coletados nos dois ambientes, considerando medições realizadas simultaneamente. Esse método permitiu controlar variações externas e evidenciar diferenças diretamente relacionadas à influência da cobertura vegetal. As diferenças foram calculadas com a subtração dos valores da clareira pelos valores correspondentes no sub-bosque, destacando as modificações microclimáticas associadas à estrutura florestal.

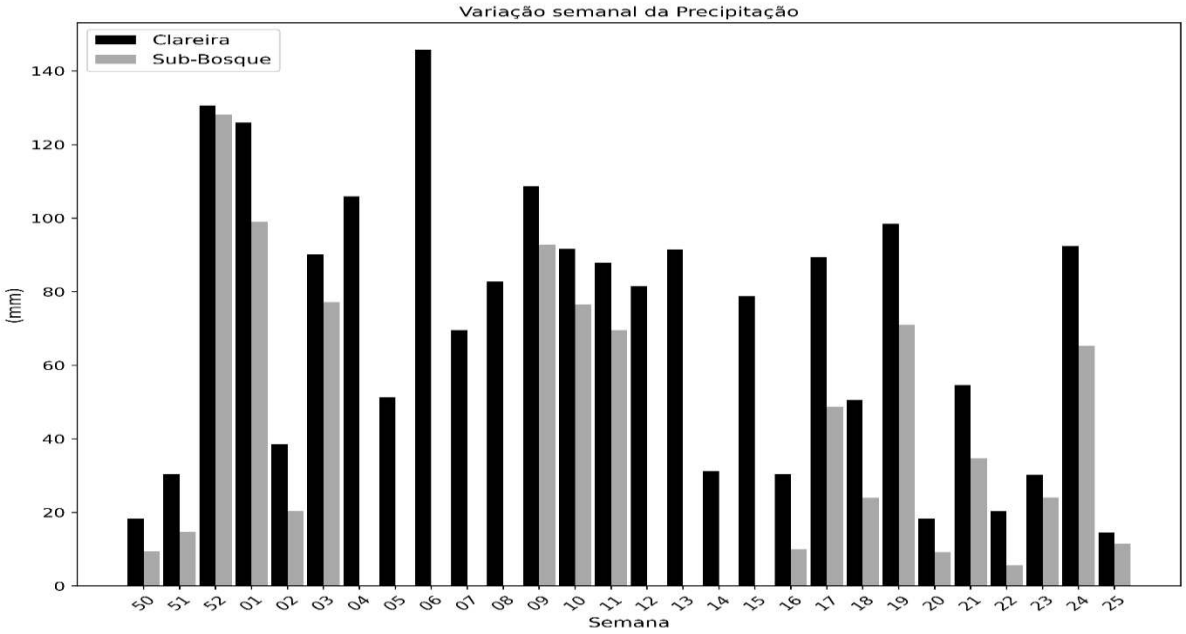
3. RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Variabilidade Sazonal

3.1.1. Precipitação

A precipitação na Reserva Florestal Adolpho Ducke, apresentou variabilidade em escalas subsazonal (semanal) e sazonal (mensal). A estação chuvosa, iniciada em dezembro, caracteriza-se por maior frequência de dias chuvosos e precipitações mais intensas (Hodnett, 1996). Em dezembro de 2020 (semanas 50 - 52) registrou um total de precipitação de 179,3 mm na área de clareira (Tabela 1), com variação semanal de 37,8 a 141,5 mm. Em contraste, a área de sub-bosque registrou um total de 110,8 mm, com variação de 17,2 a 93,6 mm.

Figura 2 - Variação semanal da precipitação na RFAD em uma área de clareira (barra preta) e no sub-bosque da floresta (barra cinza).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em janeiro de 2021, o acumulado mensal foi de 379,0 mm na clareira, com valores semanais variando de 64,0 a 102,0 mm. No sub-bosque, a precipitação total foi de 202,8 mm, com variação semanal entre 26,2 a 62,9 mm. Em fevereiro, nas semanas 05 e 08, o volume de precipitação na clareira foi de 349,5 mm, com variação semanal de 63,5 e 101,8 mm. No sub-bosque florestal o total acumulado foi de 206,5 mm, com variação semanal de 28,8 mm a 79,9 mm.

Tabela 1. Valores acumulados mensais de precipitação em (mm) durante a campanha de monitoramento na Reserva Florestal Adolpho Ducke nas áreas de Clareira e Sub-Bosque.

Acumulado Mensal de Precipitação (mm)			
	Clareira	**Sub-bosque**	**Diferença**
Dezembro - 2020*	179, 3	110, 8	68, 6
Janeiro – 2021	379, 0	202, 8	176, 2
Fevereiro – 2021	349, 5	206, 5	143, 0
Março – 2021	446, 8	238, 9	207, 9
Abril – 2021	241, 6	109, 1	132, 4
Maio – 2021	224, 8	93, 2	131, 6
Junho – 2021	157, 5	71, 8	85, 7
Total	**1978, 4**	**1033, 1**	**945, 3**

* Dados a partir de 18 até 31 de dezembro de 2020;

** Dados de 01 de janeiro até 23 de junho de 2021;

Fonte: Elaborado pelos autores.

Em março a clareira registrou um acumulado de 446,8 mm, com variação semanal de 51,3 a 140,5 mm. No sub-bosque o total foi 238,9 mm, com variabilidade de 24,2 a 84,2 mm. No mês de abril, o acumulado na clareira foi 241,6 mm, apresentando uma variabilidade de 18,8 a 123,2 mm. No sub-bosque o total mensal correspondeu a 109,1 mm, com variabilidade semanal de 5,0 a 56,9 mm.

Durante a transição da estação chuvosa para a seca, entre maio e junho (semanas 18 a 25), observou-se uma redução nos totais mensais, bem como uma menor frequência e intensidade das chuvas. Em maio, a clareira registrou 224,8 mm, enquanto no sub-bosque 93,2 mm; até 23 de junho, os acumulados foram 157,5 mm e 71,8 mm, respectivamente. Essa redução reflete a transição sazonal na Amazônia Central (Macedo *et al*., 2013), com o período menos chuvoso, iniciando a partir da metade de junho, de intensidade e duração variáveis (Hodnett, 1996). Tal incidência tem relevância ecológica, pois chuvas inferiores a 10 mm são, em grande parte, armazenadas temporariamente nas copas, retornando à atmosfera, por meio da evaporação e transpiração, contribuindo para a manutenção do ciclo hidrológico superficial.

3.1.2. Estimativa da Perda por Interceptação

O volume total de precipitação na clareira foi 1.978,4 mm, um volume equivalente também atingiu o dossel florestal. No entanto, a precipitação é particionada em duas

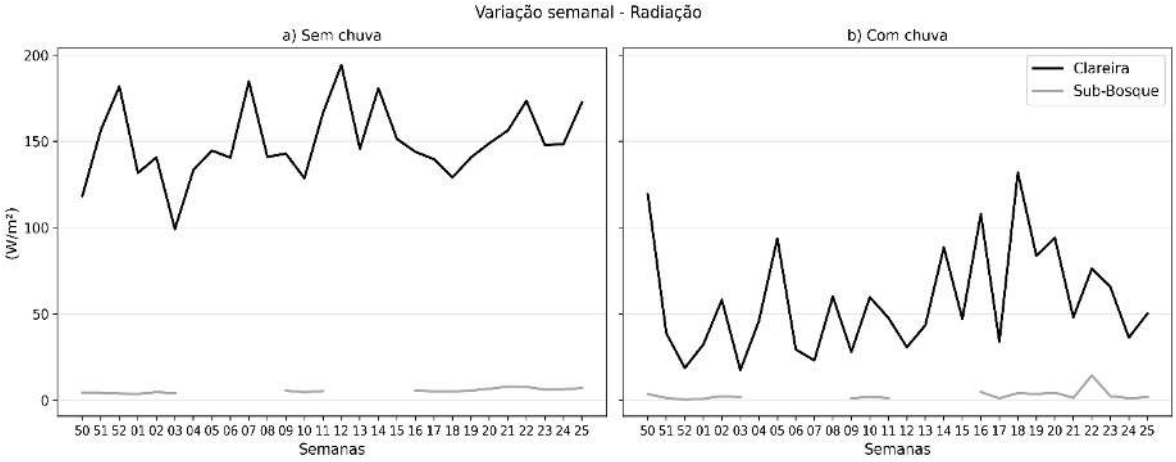
componentes principais: i) precipitação efetiva no solo e ii) perda por interceptação (Ferreira *et al.*, 2005).

No sub-bosque a precipitação efetiva foi de 1033,1 mm, enquanto a perda por interceptação, estimada pela diferença entre o total e a efetiva, foi de 945,3 mm (Tabela 1). A razão entre a precipitação efetiva e o total incidente foi de 52,2% (variação de 38% a 54%), e a interceptação representou 47,8% do total (variação de 41% a 60%), correspondendo a 945 L/m^2 de água devolvida à atmosfera via evaporação. Esses valores são significativamente maiores que estimativas anteriores na RFAD, que indicaram perdas de 8,9% a 19,8% (Franken *et al*., 1982; Franken e Leopoldo, 1984; Lloyd *et al*., 1988). A diferença pode ser atribuída às condições climáticas atípicas durante o fenômeno La Niña, que influenciou a intensidade e frequência das chuvas durante o período estudado (Fearnside, 2021; Espinosa *et al.,* 2022).

3.1.3. Radiação Solar Incidente

Conforme ilustrado na figura 3A, a máxima semanal nos dias sem chuva (DSC) foi de 194,33 $W \cdot m^{-2}$ na clareira, registrada em março (semana 10), enquanto no sub-bosque o valor máximo foi de apenas 7,87 $W \cdot m^{-2}$, observado em maio (semana 19). Os menores índices ocorreram em janeiro, com 99,88 $W \cdot m^{-2}$ na clareira (semana 03) e 1,49 $W \cdot m^{-2}$ no sub-bosque (semana 01). Vale ressaltar que, em média, a radiação acima do dossel atingiu 150 $W \cdot m^{-2}$, reduzindo-se para 55 $W \cdot m^{-2}$ nos dias com chuva.

Figura 3A - Variação média semanal da Radiação Solar Incidente (W/m²) na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

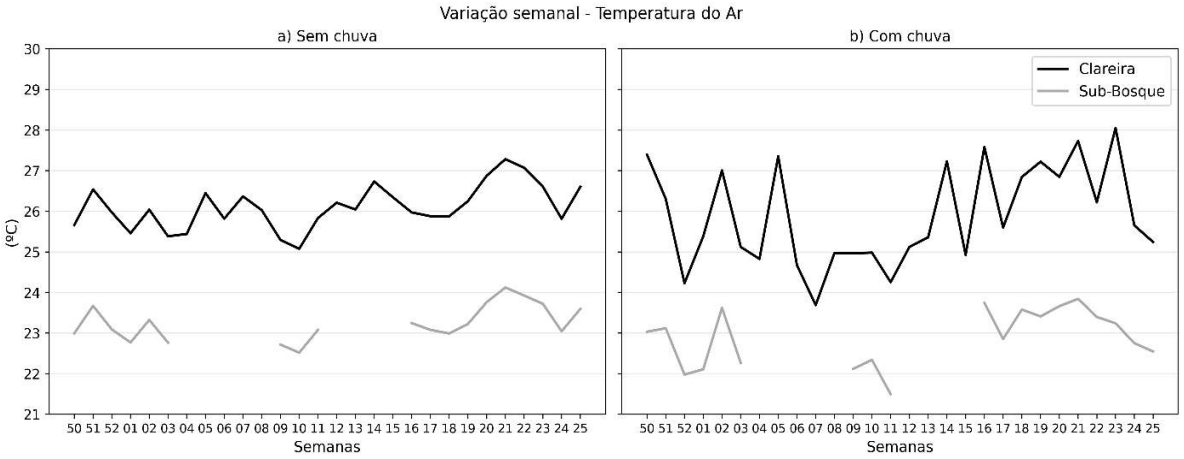
Considerando os DCC (figura 3B), os valores máximos de radiação foram registrados em maio, com 131,94 W/m² na clareira (semana 18) e de 14,44 W/m² no sub-bosque (semana 22). Os menores índices ocorreram em fevereiro, com médias semanais de 17,42 W/m² na clareira (semana 03) e apenas 0,37 W/m² no sub-bosque (semana 52). Em termos médios, a radiação que alcança o sub-bosque corresponde de 6% a 7% da radiação total acima do dossel em DSC e de 3% a 4% nos DCC. Essa atenuação da radiação pela folhagem é determinante para o efeito "buffer", que regula a temperatura e a umidade do ar no sub-bosque. Esses resultados corroboram com Bonan (2008), o qual destaca que o dossel florestal pode bloquear até 95% da radiação visível, impactando significativamente o microclima do sub-bosque.

3.1.4. Temperatura do ar

Considerando os (DSC) na clareira e no sub-bosque (Figura 4A), a temperatura na clareira variou entre 25,4 °C e 26,5 °C nas semanas 50 a 53 de dezembro e 01 a 03 de janeiro. No sub-bosque, os valores permaneceram inferiores, entre 22,7 °C e 23,7 °C. Em março (semanas 9 e 11), a clareira apresentou queda para 25,1 °C, enquanto no sub-bosque os valores variaram de 22,5 °C a 23,1 °C, evidenciando temperaturas consistentemente mais baixas. De meados de março a junho (semanas 12 a 25), a temperatura aumentou progressivamente, alcançando 25,8 °C a 27,3 °C na clareira e 23 °C a 24,1 °C no sub-bosque. Em média, o sub-bosque permaneceu 3 °C a 4 °C mais frio que a clareira durante todo o

período analisado.

Figura 4 - Variação média semanal da temperatura do ar [°C] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

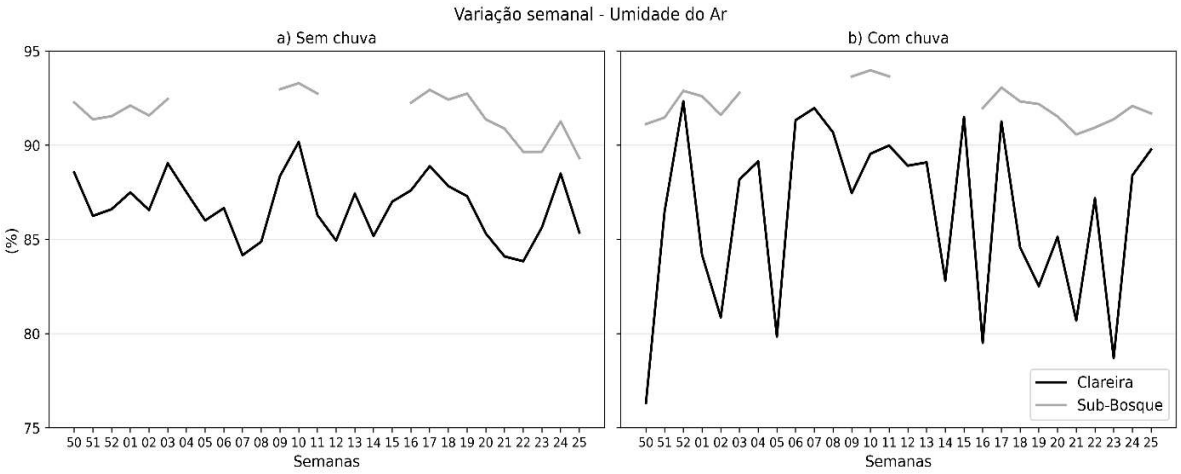
A Figura 4B apresenta os dados de temperatura do ar coletados nos dias com chuva (DCC). Na clareira, durante as (semanas 50 a 3), a temperatura variou entre 24,1 °C e 27,3 °C, enquanto no sub-bosque os valores oscilaram de 22,0 °C a 23,7 °C. Nas (semanas 9 e 11), a clareira apresentou variação de 24,3 °C a 25,0 °C, e o sub-bosque, de 21,4 °C a 22,1 °C. Entre as semanas 12 e 25, observou-se maior variabilidade intrasazonal na clareira, com temperaturas entre 24,9 °C e 27,9 °C, enquanto no sub-bosque os valores variaram de 22,7 °C a 23,8 °C.

Esses resultados corroboram com o estudo realizado por Frenne *et al*. (2019), que destacam o efeito amortecedor das florestas tropicais na regulação térmica. A redução da disponibilidade hídrica diminui a energia destinada ao fluxo de calor latente e intensifica o fluxo de calor sensível, resultando em temperaturas médias semanais mais elevadas. Consequentemente, o fluxo de calor sensível é maior na clareira do que no sub-bosque. Além disso, a nebulosidade influencia a variação semanal da temperatura ao modificar a radiação solar incidente e a proporção entre radiação direta e difusa, moderando a temperatura do ar em ambas as áreas de estudo.

3.1.5. Umidade Relativa do ar

Devido à expressiva variabilidade da precipitação ao longo do período de estudo, as médias semanais mais elevadas de umidade relativa do ar, nos DSC, foram registradas na área do sub-bosque. Nas semanas 50 e 03, a umidade relativa do ar variou de 91,3% a 92,4%, nas semanas 09 e 11, essa variação foi de 93,3% a 92,7%, já nas semanas 16 e 25 oscilou de 92,9% a 89,3%. Em contraste, na área da clareira, a umidade relativa do ar média semanal permaneceu consistentemente menor, oscilando entre 84% a 90%, apresentando maior variabilidade na escala intrasazonal (figura 5A). A diferença média entre as duas áreas de estudo foi de aproximadamente - 4,7%.

Figura 5 -Variação média semanal da Umidade Relativa do Ar (%) na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



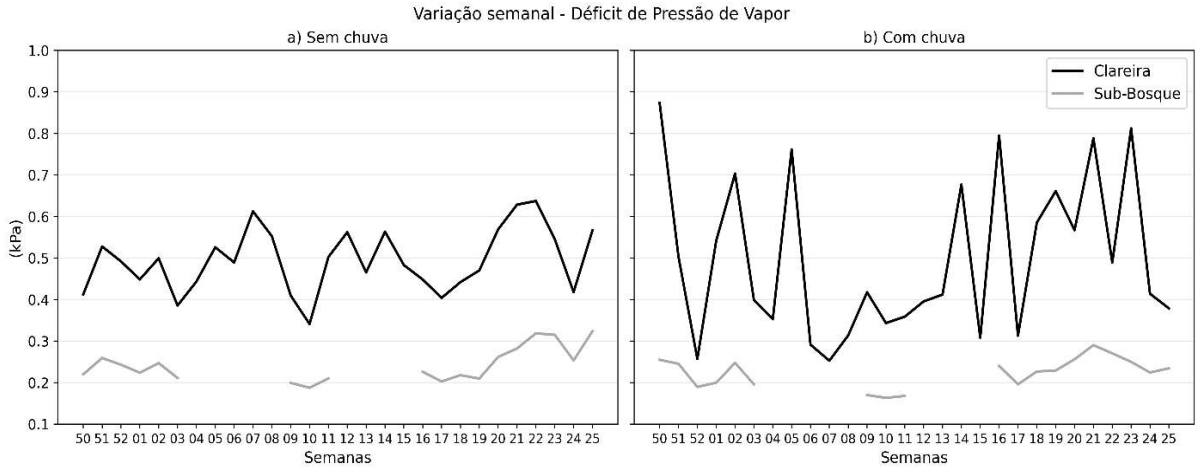
Fonte: Elaborado pelos autores.

Nos DCC (figura 5B), os valores de umidade relativa do ar na área do sub-bosque, manteve-se relativamente estável, variando de 90% a 94% ao longo do período. Em contrapartida, na clareira, a umidade relativa do ar oscilou entre 78% a 92% apresentando uma maior variação intrasazonal figura 5B. Nesse sentido, a diferença das médias de umidade relativa entre a área de Clareira e Sub-Bosque no período foi da ordem de -6,8% nos dias com chuva.

3.1.6. Déficit de Pressão de Vapor

A análise da variação sazonal do DPV evidencia diferenças notáveis entre a clareira e o sub-bosque. Na figura 6A, o DPV é consistentemente maior na área da clareira, atingindo um valor máximo de 0,65 kPa em junho, apresentando uma variação entre 0,13 a 0,26 kPa. No sub-bosque, o DPV é mais estável e com valores mais baixos, mantendo-se em torno de 0,2 a 0,3 kPa, com variação mínima, raramente ultrapassando 0,06 kPa.

Figura 6A - Variação média semanal do Déficit de Pressão de Vapor (e-sat) [hPa] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



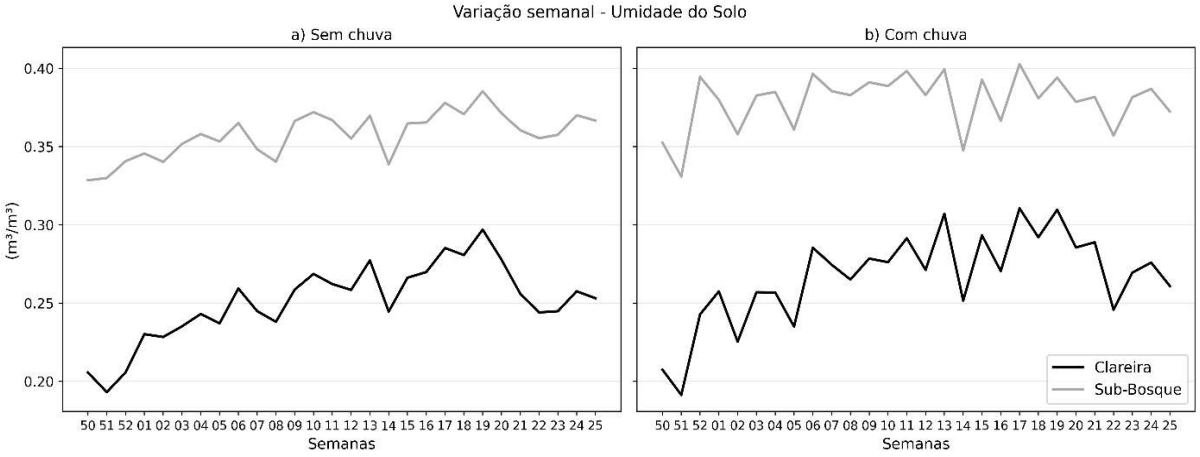
Fonte: Elaborado pelos autores.

Durante os DCC (figura 6B), a clareira também exibe valores elevados de DPV, com picos chegando a 0,88 kPa nas semanas 50-52 e uma variação de até 0,62 kPa. No sub-bosque, o DPV permanece baixo e com pouca variação, alcançando no máximo 0,26 kPa, com variações menores que 0,07 kPa ao longo do período. Já em abril, o DPV na clareira atingiu o pico de 0,79 kPa, enquanto o sub-bosque registrou 0,25 kPa, com uma diferença de variação de 0,48 kPa na clareira. Em ambos os períodos, os valores de DPV foram consistentemente maiores na clareira, destacando uma maior demanda evaporativa e uma variação mais ampla no DPV, com oscilações de até 0,28 kPa na clareira, refletindo a maior exposição da área aberta às mudanças climáticas.

3.1.7. Umidade do Solo

A figura 7A, apresenta a umidade do solo nos (DSC), evidenciando uma tendência de redução em ambas as áreas. Na clareira, os valores oscilaram entre 0,19 m³/m³ e 0,28 m³/m³, enquanto no sub-bosque as variações são da ordem de 0,32 m³/m³ a 0,37 m³/m³. Apesar da diferença entre as áreas manter-se relativamente constante, a redução foi mais acentuada na clareira, evidenciando menor capacidade de retenção hídrica em condições de estiagem. No sub-bosque, o declínio menos acentuado indica maior resiliência hídrica, possivelmente associado ao microclima proporcionado pela cobertura arbórea e ao maior teor de matéria orgânica no solo.

Figura 7 - Variação média semanal da umidade do solo [m³/m³] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

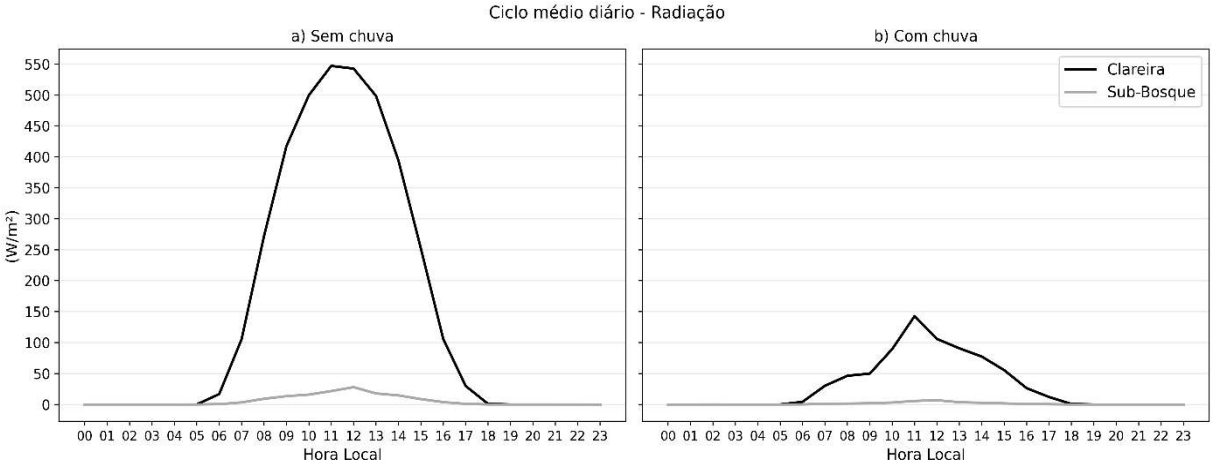
Conforme ilustrado na figura 7B, durante os DCC, o sub-bosque florestal apresentou valores de umidade do solo consistentemente mais elevados em comparação com a clareira. No sub-bosque, os valores oscilaram entre 0,32 e 0,40 m³/m³, enquanto na clareira esses valores oscilaram entre 0,19 a 0,31 m³/m³. As flutuações na clareira foram mais pronunciadas, evidenciando maior sensibilidade às condições externas, como chuvas intensas seguidas por rápida evaporação. Em contrapartida, a umidade do solo no sub-bosque demonstrou maior estabilidade, o que pode ser atribuído à presença da cobertura vegetal densa, que contribui para a retenção da água no solo.

3.2. Análise do Ciclo Médio Diário

3.2.1. Radiação Solar Incidente

A análise do ciclo médio diário da radiação solar nas áreas de clareira e sub-bosque na RFAD, considerou dias sem chuva (DSC) e com chuva (DCC). Observou-se que a radiação solar começa a aumentar a partir das primeiras horas da manhã, às 5h na clareira e às 6h no sub-bosque, atingindo seu pico entre 11h e 12h. Além disso, a intensidade da radiação solar na clareira foi cerca de 20 vezes maior do que no sub-bosque, onde a vegetação intercepta consideravelmente a radiação. Em DSC, a radiação média variou de 547,09 W/m² na clareira para 27,94 W/m² no sub-bosque figura 8A.

Figura 8 - Ciclo médio diário da Radiação Solar Incidente (W/m²) na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em DCC figura 8B, variou de 142,83 W/m² na clareira para 6,81 W/m² no sub-bosque. Comparativamente, em DSC, apenas 5,15% da radiação solar incidente na clareira alcançou o sub-bosque, enquanto em DCC esse valor foi de 6,44%. Além do mais, diferenças no horário de máxima radiação solar também foram constatadas, com a clareira atingindo o pico uma hora antes do sub-bosque.

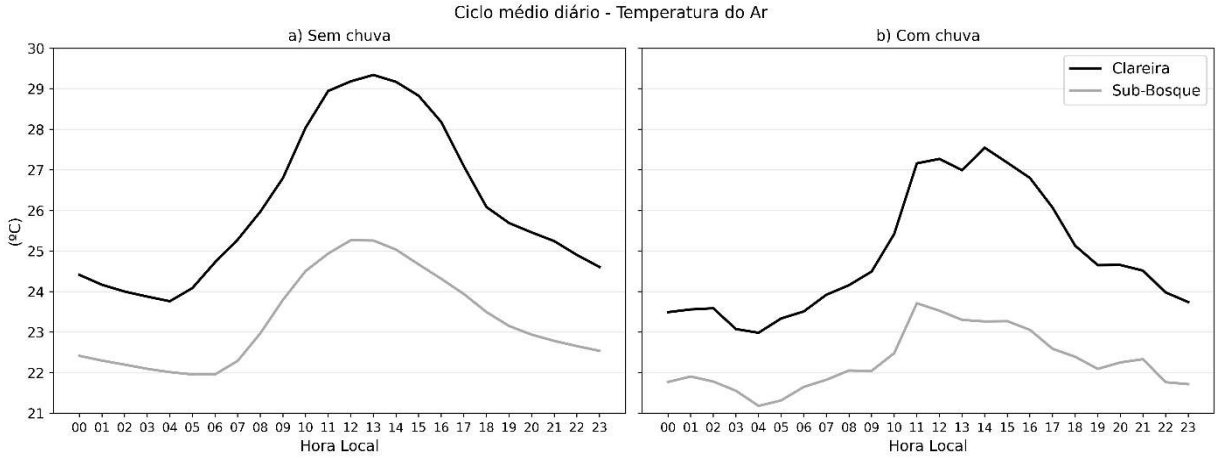
Esses resultados corroboram com o estudo de Bonan (2008), o qual destaca que a copa das árvores pode bloquear até 95% da luz visível que chega ao solo, impactando o microclima do sub-bosque. De forma semelhante Frenne *et al.*, (2019), evidenciaram o efeito de

amortecimento térmico e de radiação proporcionado pelas florestas tropicais. Similarmente, outro estudo que se alinha às observações realizadas neste estudo é o trabalho realizado por Hardwick *et al.*, (2015), que destacou como o índice de área foliar impacta diretamente o microclima sob a cobertura vegetal. Em contraste, Lloyd et al. (1988) relataram valores ligeiramente superiores de radiação incidente no sub-bosque, o que pode ser atribuído a diferenças na densidade do dossel ou métodos de medição.

3.2.2. Temperatura do ar

A Figura 9A apresenta a variação diurna da temperatura do ar na clareira e no sub-bosque da Reserva Florestal Adolpho Ducke nos DSC. A clareira apresentou maior amplitude térmica, com máxima de 29,4 °C, entre 12:00 e 13h e mínima de 23,8 °C, registrada às 04h, resultado da maior incidência de radiação solar. No sub-bosque, a variação foi menos intensa, com máxima de 25,4 °C entre 12:00 e 13h (horário Manaus) e mínima de 21,9 °C às 06h. As diferenças observadas entre as áreas evidenciam o efeito atenuador do dossel sobre balanço de energia e na estabilidade térmica.

Figura 9 - Ciclo médio diário da Temperatura Relativa do Ar [°C] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 9B (DCC) evidencia menor amplitude térmica em relação aos DSC, com máximas e mínimas na clareira de 27,8 °C e 22,9 °C e no sub-bosque de 23,7 °C e 21,2 °C. A precipitação, ao aumentar a umidade do ar e do solo, atenua o aquecimento diurno e o

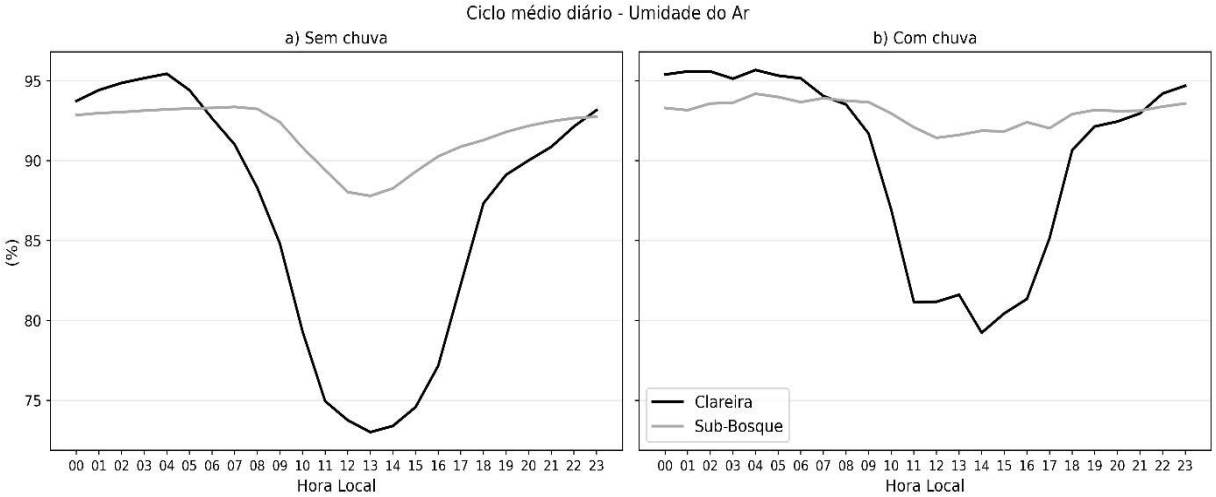
resfriamento noturno, reduzindo as diferenças térmicas entre as áreas. Esse padrão corrobora com o estudo realizado por Salati e Marques (1984), que destacam a interação entre radiação solar, cobertura florestal e dinâmica térmica.

No entanto, à noite, em ambos os cenários, observa-se resfriamento progressivo do ar, controlado pelo balanço de radiação de ondas longas. O efeito é mais intenso na clareira, devido à ausência de barreiras que limitem perdas radiativas, enquanto no sub-bosque a cobertura vegetal restringe as trocas de energia, atenuando o resfriamento. De acordo com Mahrt et al. (2001), esse processo é acentuado em áreas abertas e mitigado em ambientes protegidos por vegetação.

3.2.3. Umidade Relativa do ar

A Figura 10A mostra a variação horária da umidade relativa do ar na clareira e no sub-bosque durante os DSC. Observa-se que os valores máximos ocorrem à noite, com 95,1% na clareira e 93% no sub-bosque. Com o aumento da radiação solar pela manhã, a umidade relativa diminui, alcançando mínimos de 73% na clareira e 87,5% no sub-bosque entre 12h e 14h. A partir desse período, a umidade volta a aumentar à medida que a radiação e a temperatura do ar diminuem. O sub-bosque se mantém consistentemente mais úmido que a clareira, em função à menor exposição à radiação solar direta, o que contribui para a estabilidade hídrica e o microclima mais ameno nessa camada da floresta.

Figura 10 - Ciclo médio diário da Umidade Relativa do Ar [%] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



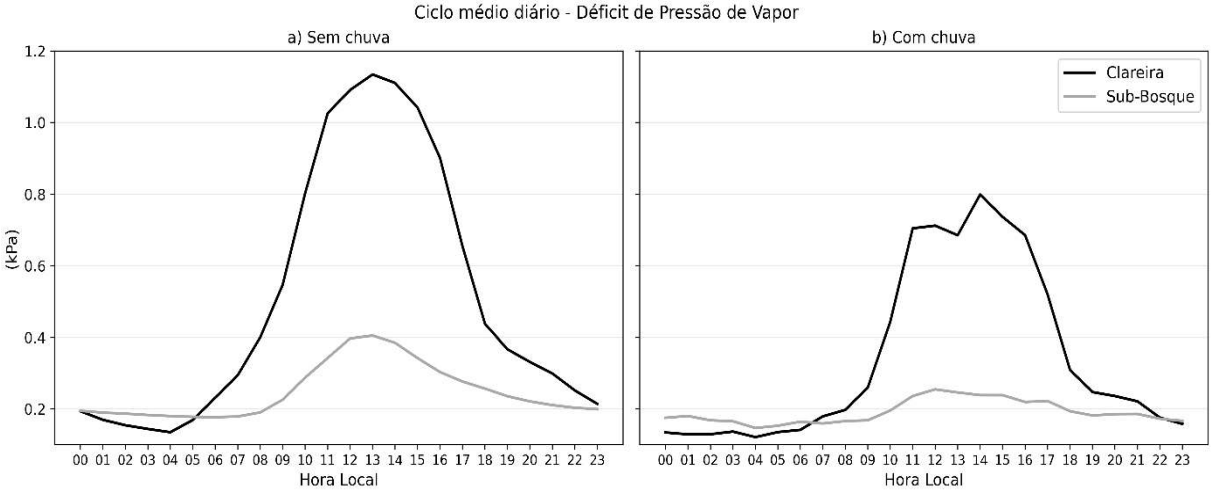
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 10B, a umidade relativa apresentou menor variação, favorecida pela maior disponibilidade de água na superfície. Em dias chuvosos, a clareira variou entre 79,5% e 95,5%, enquanto no sub-bosque os valores permaneceram entre 91,8% e 94%. Os resultados mostram que a cobertura vegetal, especialmente o sub-bosque, modera a amplitude diária da umidade e evidencia o efeito da precipitação.

3.2.4. Déficit de Pressão de Vapor

A Figura 11A ilustra o comportamento diário do déficit de pressão de vapor (DPV) na clareira e no sub-bosque durante os DSC. O valor médio diário de DPV foi de 0,91 kPa na clareira e 0,41 kPa no sub-bosque, com pico às 13h. A partir das 17h, os valores caíram para 0,43 kPa na clareira e 0,28 kPa no sub-bosque.

Figura 11 - Ciclo médio diário do Déficit de Pressão de Vapor (esat-e) [hPa] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



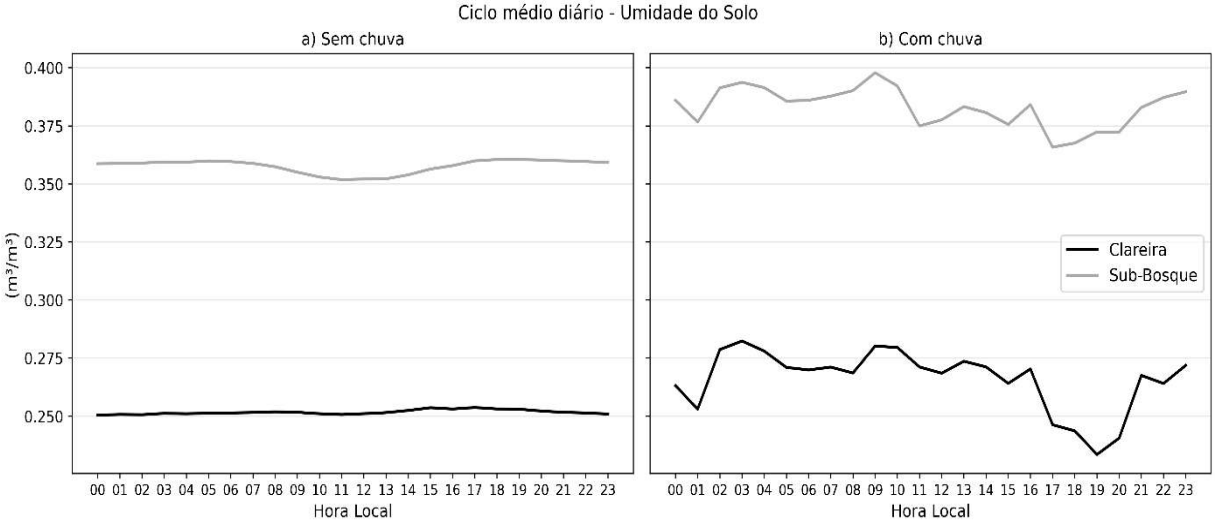
Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Figura 11B, o DPV foi menor, com máximas de 0,39 kPa na clareira e 0,25 kPa no sub-bosque. Os valores mínimos registrados foram 0,04 kPa e 0,15 kPa às 5h. Durante o dia, o DPV aumentou com a temperatura e a diminuição da umidade relativa. Com isso, a maior densidade foliar e umidade do solo no sub-bosque favoreceram a transpiração, reduzindo o aumento do DPV e a amplitude diária em comparação à clareira.

3.2.5. Umidade do Solo

Os resultados das Figuras 12A e 12B indicam que a abertura do dossel e a precipitação influenciam significativamente a umidade do solo. Na Figura 12A, a umidade apresentou maior flutuação ao longo do dia, atingindo valores máximos durante a noite. Na clareira, a umidade do solo variou entre 0,24 e 0,25 m^3/m^3, enquanto no sub-bosque entre 0,35 e 0,36 m^3/m^3. A maior redução no sub-bosque ocorreu entre 06h e 13h, resultando em uma diferença média de 0,10 m^3/m^3 em relação à clareira, evidenciando a influência do dossel na retenção hídrica do solo.

Figura 12 - Ciclo médio diário da Umidade do Solo [m³/m³] na área de clareira (linha preta) e no sub-bosque na Reserva Florestal Adolpho Ducke (linha cinza), Manaus-AM. Valores médios para o período de 18/12/2020 a 23/06/2021. (A) para dias sem precipitação (DSC) e (B) para dias com precipitação (DCC).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme mostra a figura 12B, a umidade do solo na clareira variou de 0,25 e 0,28 m³/m³, enquanto no sub-bosque de 0,38 e 0,40 m³/m³. Durante o dia, observou-se que uma diminuição da umidade, alcançando cerca de 0,23 m³/m³ na clareira e 0,36 m³/m³ no sub-bosque, entre 17h e 18h. A diferença de umidade entre as áreas manteve-se relativamente estável, variando de 0,10 a 0,14 m³/m³. Esses resultados evidenciam que as condições microclimáticas influenciam a dinâmica da umidade do solo, sendo que no sub-bosque denso favorece uma maior retenção de água em comparação à clareira.

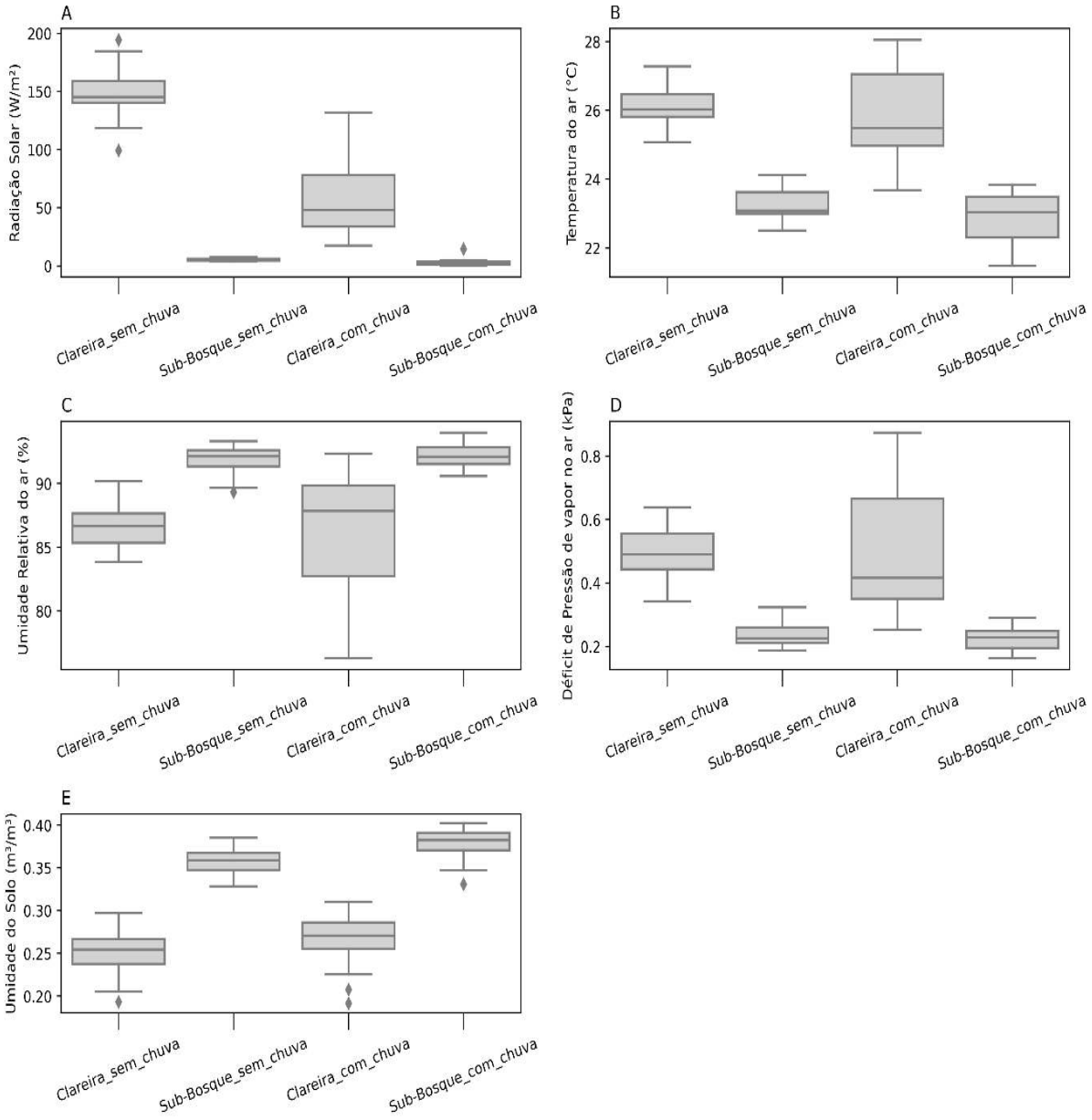
3.2.6. Síntese da Análise Descritiva

Os elementos climáticos das áreas de clareira e sub-bosque florestal apresentaram ampla variabilidade, com alterações significativas no padrão sazonal. Para representar essa variabilidade, os resultados foram organizados em diagramas de caixa (*boxplot*), apresentados na figura 13.

Cada *boxplot* representa a distribuição temporal das médias semanais de cinco variáveis microclimáticas radiação solar incidente figura 13A, temperatura do ar figura 13B, umidade relativa do ar figura 13C, déficit de pressão de vapor figura 13D e umidade do solo figura 13E. Os dados foram registrados a cada 10 segundos e, posteriormente, calculados a média a cada 10 minutos, no período de 18 de dezembro de 2020 a 23 de junho de 2021 (28

semanas). Na representação dos diagramas, a linha interna da caixa indica a mediana, as bordas superior e inferior correspondem a 75° e 25° percentis, respectivamente, e as barras verticais delimitam os valores mínimo e máximo registrados, destacando a amplitude dos dados.

Figura 13 - Distribuição temporal das médias semanais: (A) Radiação solar incidente (W/m2); (B) Temperatura do ar(°C); (C) Umidade Relativa do ar (%); (D) Déficit de Pressão de Vapor (kPa); (E) Umidade do solo (m^3/m^3).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados revelaram que a radiação solar foi mais elevada na clareira (100 a 180 W/m²), enquanto no sub-bosque variou entre 2,4 e 8,9 W/m² figura 13A, o que destaca maior entrada de radiação solar na clareira e refletindo o impacto direto da remoção de cobertura vegetal e o consequente aumento dos níveis de energia disponíveis no solo.

A temperatura do ar também apresentou diferenças entre as áreas: na clareira, os valores foram mais elevados, devido à maior exposição à radiação, enquanto no sub-bosque, as temperaturas foram menores, refletindo o efeito moderador da cobertura vegetal figura 13B.

Quanto à umidade relativa do ar na clareira, apresentou maior variabilidade, resultado da maior exposição aos fatores climáticos externos, enquanto no sub-bosque manteve-se consistentemente elevada, com variações estreitas, indicando um ambiente mais estável figura 13C. O déficit de pressão de vapor foi mais alto na clareira, indicando maior potencial de evapotranspiração, enquanto a umidade do solo permaneceu alta e estável no sub-bosque, contrastando com os baixos valores observados na clareira figura 13D. Este estudo evidenciou a significativa influência do dossel florestal da Reserva Adolpho Ducke na modulação dos elementos microclimáticos em escala sazonal e diurna e destacando o papel essencial da cobertura vegetal na regulação do microclima local.

Além disso, as diferenças observadas entre as áreas de clareira e sub-bosque confirmam que o dossel reduz a radiação solar incidente, modera a temperatura do ar, aumenta a umidade relativa e conserva a umidade do solo figura 13E, criando um microclima mais favorável à manutenção da biodiversidade local. A capacidade de amortecimento do dossel, quantificada neste trabalho, revelou sua importância na regulação da radiação solar, na redução da temperatura, no aumento da umidade relativa e na conservação da umidade do solo, especialmente em dias secos e horários de maior demanda energética.

No entanto, a pesquisa também destacou a vulnerabilidade desse sistema frente à intensificação das pressões urbanas, pois o avanço da malha urbana de Manaus e o efeito de ilha de calor urbano podem impactar negativamente a densidade do dossel e a disponibilidade hídrica da reserva, comprometendo sua capacidade de regular o microclima e de sustentar a biodiversidade. Esses potenciais impactos reforçam a necessidade urgente de ações integradas entre a gestão urbana e a conservação ambiental.

Nesse sentido, os dados obtidos e a estratégia de monitoramento aplicada neste estudo fornecem ferramentas valiosas para a formulação de políticas públicas voltadas à preservação da Reserva Adolpho Ducke. Além dos que, essas informações permitem avaliar os efeitos da expansão urbana e planejar medidas de mitigação, garantindo a integridade ecológica da reserva e sua função como regulador climático local. Assim, este trabalho não apenas contribui para o entendimento dos processos microclimáticos em ecossistemas florestais, mas também contribui para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis que conciliem o crescimento urbano com a preservação ambiental.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciaram que o microclima no sub-bosque florestal é mais estável em comparação às condições registradas na área de clareira. As análises indicaram que a clareira apresenta temperaturas médias e máximas do ar mais elevadas, além de uma umidade relativa média mais baixa em relação ao sub-bosque. Esses fatores, somados à maior evaporação da água na camada superficial do solo, resultam em uma redução significativa na quantidade de água disponível na camada superior do perfil do solo.

A radiação solar incidente diária também mostrou diferenças substanciais entre as duas áreas. A cobertura vegetal, ao bloquear e absorver parte da radiação solar, desempenha um papel fundamental no amortecimento das variações climáticas, favorecendo condições de maior umidade e prolongando o tempo de permanência do solo úmido no sub-bosque em comparação à clareira. Os dados reforçam ainda que os extremos de temperatura são mais bem regulados nas áreas florestadas. Dentro do sub-bosque, as temperaturas máxima, média e mínima diárias são consistentemente menores, enquanto na clareira são mais elevadas, especialmente durante os períodos de maior incidência de radiação solar.

A precipitação também desempenhou um papel fundamental na variabilidade da umidade do solo. Contudo, sua distribuição entre as áreas de clareira e sub-bosque foi influenciada pela interceptação da chuva pela cobertura vegetal, que reteve 53,21% da precipitação incidente. Esse processo resultou em diferença percentual de umidade do solo de 7,84% na clareira e 6,94% no sub-bosque. Estes achados ressaltam a importância do dossel florestal na regulação climática local e na manutenção da umidade do solo, especialmente em contextos de fragmentação florestal e mudanças ambientais. Em trabalhos futuros

recomenda-se o monitoramento climático de longo prazo para avaliar os impactos do crescimento da área urbana de Manaus sobre o clima da floresta Ducke e a intensificação do efeito de ilha de calor. Estas informações devem ser repassadas ao órgão de gestão ambiental e planejamento urbano no sentido de mostrar a importância da preservação da floresta Ducke.

Adicionalmente, investigações complementares sobre a influência de eventos climáticos extremos na dinâmica do microclima e umidade do solo podem contribuir para o planejamento de estratégias mais eficazes de conservação.

REFERÊNCIAS

BETTS, A. K. *et al*. Assessment of the land surface and boundary layer models in two operational versions of the NCEP Eta model using FIFE data. *Monthly Weather Review, American Meteorological Society*, v. 125, n. 11, p. 2896–2916, 1997.

BETTS, R. A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, v. 408, n. 6809, p. 187–190, 2000.

BRAMER, I. *et al*. Chapter three - advances in monitoring and modelling climate at ecologically relevant scales. In: BOHAN, D. A. et al. (Ed.). Next Generation Biomonitoring: Part 1. Academic Press, 2018, (*Advances in Ecological Research*, v. 58). p. 101–161.

BLONDER, B. *et al*. Extreme and highly heterogeneous microclimates in selectively logged tropical forests. *Frontiers in Forests and Global Change*, v. 1, p. 5, 2018.

BONAN, G. B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. S*cience*, v. 320, n. 5882, p. 1444–1449, 2008.

CHASE, T. N. *et al*. Simulated impacts of historical land cover changes on global climate in northern winter. *Climate dynamics*, v. 16, n. 2, p. 93–105, 2000.

CHAUVEL, A.; LUCAS, Y.; BOULET, R. On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil. *Experientia*, v. 43, n. 3, p. 234–241, 1987.

ESPINOZA, Jhan-Carlo *et al*. The new historical flood of 2021 in the Amazon River compared to major floods of the 21st century: atmospheric features in the context of the intensification of floods. *Weather and Climate Extremes*, v. 35, p. 100406, 2022.

FEARNSIDE, P. M. As lições dos eventos climáticos extremos de 2021 no Brasil: 1–A enchente na Amazônia. Disponível em: https://amazoniareal.com.br/. Acessado em: 25/01/24.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia

Central. *Acta Amazônica*, v. 35, p. 55–62, 2005.

FISCH, G. *et al*. Simulações climáticas do efeito do desmatamento na Região Amazônica: Estudo de um caso em Rondônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 12, n. 1, p. 33–48, 1997.

FRENNE, P. D. *et al*. Global buffering of temperatures under forest canopies. *Nature Ecology & Evolution*, v. 3, n. 5, p. 744–749, 2019.

FRANKEN, W.; LEOPOLDO, P. Hydrology of catchment areas of Central-Amazonian forest streams. In: *The Amazon: Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin.* Dordrecht: Springer Netherlands, 1984. p. 501–519.

FRANKEN, W. *et al*. Estudo da interceptação da água de chuva em cobertura florestal amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazonica*, v. 12, n.2, p. 327–331, 1982.

GAUR, N.; MOHANTY, B. P. Evolution of physical controls for soil moisture in humid and subhumid watersheds. *Water Resources Research*, v. 49, n. 3, p. 1244–1258, 2013.

GHIMIRE, U. *et al*. Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge: A case study of the Bangkok area, Thailand. *Science of The Total Environment*, v. 792, p. 148370, 2021.

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.

HODNETT, M. Deep soil water uptake by forest and pasture in central Amazonia: predictions from long-term daily rainfall data using a simple water balance model. *Amazonian deforestation and climate*, p. 79–99, 1996.

HOFMEISTER, J. *et al*. Microclimate edge effect in small fragments of temperate forests in the context of climate change. *Forest Ecology and Management*, v. 448, p. 48–56, 2019.

HOPKINS, M. J. Flora da reserva Ducke, amazonas, brasil. *Rodriguésia*, v. 56, p. 09–25, 2005.

KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, v. 423, n. 6939, p. 528–531, 2003.

LAURANCE, W. F. *et al*. Rain Forest fragmentation and the dynamics of amazonian tree communities. *Ecology*, v. 79, n. 6, p. 2032–2040, 1998.

LENOIR, J.; HATTAB, T.; PIERRE, G. Climatic microrefugia under anthropogenic climate change: implications for species redistribution. *Ecography*, v. 40, n. 2, p. 253–266, 2017.

LLOYD, C. R. *et al*. The measurement and modelling of rainfall interception by amazonian rain forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, Elsevier, v. 43, n. 3-4, p. 277–294, 1988.

MACEDO, B. G. Fenologia de Aniba Rosaeodora Ducke (lauraceae) na Reserva Florestal Adolpho Ducke (rfad) e Estação Experimental de Silvicultura tropical (eest). Nos últimos 10 anos. In: *I Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq-PAIC/FAPEAM*. [S.l.: s.n.], 2012.

MACÊDO, M. d. N. C. d. *et al*. Precipitação pluviométrica e vazão da bacia hidrográfica do Riozinho do Rôla, Amazônia Ocidental. *Revista Ambiente & Água*, v. 8, p. 206–221, 2013.

MACHADO, A. L. S.; PACHECO, J. B. Serviços ecossistêmicos e o ciclo hidrológico da bacia hidrográfica amazônica-the biotic pump. *Revista Geonorte*, v. 1, n. 1, p. 71–89, 2010.

MARQUES FILHO, A. O.; DALLAROSA, R. G. Interceptação de radiação solar e distribuição espacial de área foliar em floresta de terra firme da Amazônia Central, Brasil. *Acta Amazônica*, v. 30, n.3, p. 453-464, 2000.

MILLER, B. D. *et al*. Only sun-lit leaves of the uppermost canopy exceed both air temperature and photosynthetic thermal optima in a wet tropical forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 301, p. 108347, 2021.

NEGRÓN-JUÁREZ, R. I. et al. Vulnerability of Amazon forests to storm-driven tree mortality. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 5, p. 054021, 2018.

NEPSTAD, D. C. *et al*. Interactions among amazon land use, forests and climate: prospects for a near-term forest tipping point. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 363, n. 1498, p. 1737–1746, 2008.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climate*, v. 4, n. 10, p. 957–988, 1991.

OLIVEIRA, F. M. *et al*. Determinação da variação no microclima de Manaus-Am por atividades antropogênicas e modulações climáticas naturais. *Acta Amazonica*, v. 38, n. 4, p. 687–699, 2008.

PORPORATO, A. *et al*. Ecohydrology of water-controlled ecosystems. *Advances in Water Resources*, v. 25, n. 8-12, p. 1335–1348, 2002.

ROCHA, V. M. *et al*. Reciclagem de precipitação na bacia amazônica: O papel do transporte de umidade e da evapotranspiração da superfície. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 32, p. 387–398, 2017.

SALATI, E.; NOBRE, C. A. Possible climatic impacts of tropical deforestation. In: *Tropical forests and climate*. Springer, 1991. p. 177–196.

SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G. A. *et al*. Integrity and isolation of Costa Rica national parks and biological reserves: examining the dynamics of land-cover change. *Biological Conservation,* v. 109, n. 1, p. 123–135, 2003.

SATYAMURTY, P.; COSTA, C. P. W.; MANZI, A. O. Moisture source for the Amazon basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 111, n. 1, p. 195–209, 2013.

SOARES-FILHO, B. S. *et al*. Modelling conservation in the Amazon Basin. *Nature*, v. 440, n. 7083, p. 520–523, 2006.

TOLEDO, J. J. Influência do solo e topografia sobre a mortalidade de árvores e decomposição de madeira em uma floresta de terra-firme na Amazônia Central. Tese (Doutorado em Ciências) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2009.

WHITMORE, T. C. Gaps in the forest canopy. *Tropical trees as living systems*., Cambridge University Press, 1978.

ZHAO, M.; PITMAN, A.; CHASE, T. The impact of land cover change on the atmospheric circulation. *Climate Dynamics*, v. 17, n. 5, p. 467-477, 2001.