



GOVERNO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA
CENTRO DE FORMAÇÃO EM CIÊNCIAS AGROFLORESTAIS



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA

BEATRIZ ALVES LINS

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DA FLORESTA
ATLÂNTICA DE TABULEIRO**

ITABUNA – BAHIA

2025

BEATRIZ ALVES LINS

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DA FLORESTA
ATLÂNTICA DE TABULEIRO**

ITABUNA – BAHIA

2025

BEATRIZ ALVES LINS

**EFEITOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA DINÂMICA DA FLORESTA
ATLÂNTICA DE TABULEIRO**

Aprovado: 09 de dezembro de 2025



Documento assinado digitalmente
LUIZ FERNANDO SILVA MAGNAGO
Data: 17/12/2025 16:10:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fernando Silva Magnago
Presidente
(Orientador ou coorientador)
Universidade Federal do Sul da Bahia/UFSB



Documento assinado digitalmente
JOMAR GOMES JARDIM
Data: 17/12/2025 14:30:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jomar Gomes Jardim
Membro Convidado
Universidade Federal do Sul da Bahia



Documento assinado digitalmente
DANIEL PIOTTO
Data: 17/12/2025 16:05:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Piotto
Membro Convidado
Universidade Federal do Sul da Bahia

DEDICATÓRIA

A minha querida mãe, Verônica,
por sempre me incentivar a
conquistar os meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a força que me rege, Deus e aos meus mentores espirituais, por me guiarem na busca pelos meus objetivos.

Aos meus pais Verônica e Itamar, pela base familiar, em que tive capacidade de desenvolver estrutura emocional, tendo foco e resiliência ao longo de minha trajetória acadêmica.

Ao meu esposo Saulo, que está comigo desde o início, sendo uma bússola me orientando a direção.

Aos meus irmãos mais velhos, Victor e Tales, por serem meus exemplos. Ao meu irmão mais novo Saulo Lins por demonstrar admiração e respeito, o que me impulsionou a essa conquista.

Aos meus sobrinhos, Pedro, Marcelo e Marina, por trazerem alegria a minha vida.

As minhas tias Gilvânia e Núbia por serem minha referência profissional e pelo apoio financeiro.

A minha madrastra Hellen, tia Larissa e vó Dórea por acreditarem em mim, me dando suporte nos meus primeiros anos acadêmicos.

A minha amiga de infância Julia, pela lealdade durante todos os anos de minha vida.

Aos meus amigos, que tive a honra de reencontrá-los nessa existência, Amanda, Hiago, Yasmim, Alvinho, Mirella, Felipe, Raquel, Mateus, Cassiano e Raphael por estarem sempre ao meu lado, com incentivo, apoio e gestos de amizade.

A minha amiga Brenda, por me acolher durante muitos momentos da minha juventude.

Ao meu orientador e amigo Luiz, que me abriu as portas desde o início da minha graduação.

Aos meus professores e orientadores Ricardo e Jomar, pelas oportunidades e aprendizados.

Aos meus queridos colegas, Daniel, Edylla, Calline, Vitor, Shakespeare, João Pedro, Gabriel, Dandara e Gabriele, pela família que formamos dentro da universidade.

Por fim, agradeço imensamente a todos os professores do curso, que me ensinaram não só conceitos e cálculos, mas lições de vida. Cada um foi essencial para que eu realizasse esse sonho. A admiração que tenho por cada um de vocês, despertou em mim a confiança necessária para acreditar no meu próprio caminho

RESUMO

As mudanças climáticas têm alterado as condições ambientais que sustentam as florestas tropicais, por meio do aumento da temperatura, da intensificação das secas e da maior demanda evaporativa da atmosfera. Em biomas como a Mata Atlântica, onde a estrutura e o funcionamento da floresta dependem da interação entre diferentes classes de tamanho, compreender como o clima influencia processos demográficos é essencial para prever sua resiliência. Este estudo avaliou como o déficit de pressão de vapor (VPD), indicador da demanda evaporativa da atmosfera, modula a dinâmica da floresta: mortalidade, recrutamento e sobrevivência em diferentes classes diamétricas de uma floresta de tabuleiro na Mata Atlântica, com base em uma série histórica de 37 anos (1980–2017). Utilizou-se o monitoramento de cinco parcelas permanentes com todos os indivíduos com DAP ≥ 10 cm, classificados em três classes diamétricas (I, II e III). As taxas anuais de mortalidade, recrutamento e sobrevivência foram estimadas por meio da equação exponencial, relacionando o número inicial e final de indivíduos em cada intervalo de medição, e modelos lineares generalizados mistos (GLMMs) foram empregados para estimar os efeitos do VPD e das classes de tamanho, considerando parcela como componente aleatório. Os resultados revelam que o VPD é um forte modulador da dinâmica florestal. A mortalidade aumenta significativamente com o VPD, enquanto a sobrevivência diminui na mesma proporção. Em condições de VPD baixo, mantém-se o gradiente clássico de tamanho, com maior mortalidade em árvores pequenas e menor mortalidade em árvores grandes. No entanto, sob VPD elevado, esse padrão se altera: árvores de grande porte perdem sua vantagem demográfica e passam a apresentar mortalidade semelhante ou superior à de classes menores, indicando maior vulnerabilidade ao estresse atmosférico. O recrutamento não respondeu ao VPD, mas apresentou elevada variância entre parcelas, sugerindo forte controle local, enquanto mortalidade e sobrevivência mostraram variação espacial pequena. Esses resultados revelam que a reposição populacional não acompanha de forma uniforme a perda de indivíduos em anos secos. Descobrimos que a elevação do VPD compromete a estabilidade estrutural do fragmento analisado, afetando árvores grandes, que concentram a maior parte da biomassa e do carbono. A intensificação do estresse atmosférico pode promover reorganização estrutural, reduzir a capacidade de estocagem de carbono e comprometer a resiliência da floresta frente às mudanças climáticas.

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA

Climate change has increasingly altered the environmental conditions that sustain tropical forests through rising temperatures, intensified droughts, and higher atmospheric evaporative demand. In biomes such as the Atlantic Forest, where forest structure and functioning depend on interactions among different size classes, understanding how climate shapes demographic processes is essential for predicting ecosystem resilience. This study evaluated how vapor pressure deficit (VPD), an indicator of atmospheric evaporative demand, modulates forest dynamics, mortality, recruitment, and survival, across different diameter classes in a lowland Atlantic Forest, based on a 37-year monitoring record (1980–2017). We used long-term measurements from five permanent plots containing all individuals with DAP ≥ 10 cm, classified into three diameter classes (I, II, and III). Annual mortality, recruitment, and survival rates were estimated using an exponential equation relating the initial and final number of individuals in each census interval, and generalized linear mixed models (GLMMs) were employed to quantify the effects of VPD and size classes, with plot included as a random component. The results reveal that VPD is a strong driver of forest dynamics. Mortality increases significantly with rising VPD, whereas survival decreases accordingly. Under low VPD, the classical size-related demographic gradient is maintained, with higher mortality in small trees and lower mortality in large individuals. However, under high VPD, this pattern shifts: large trees lose their demographic advantage and show mortality rates similar to or higher than smaller classes, indicating increased vulnerability to atmospheric stress. Recruitment did not respond to VPD but showed high spatial variance among plots, suggesting strong local control, whereas mortality and survival exhibited little spatial variation. These findings indicate that population replacement does not keep pace with individual losses during dry years. We found that increasing VPD compromises the structural stability of the studied fragment, disproportionately affecting large trees, which store most of the forest biomass and carbon. Thus, intensified atmospheric stress may promote structural reorganization, reduce carbon-storage capacity, and undermine forest resilience in the face of ongoing climate change.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. Dinâmica Florestal.....	11
2.2. Mudanças climáticas em florestas tropicais.....	12
2.3. Temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor (VPD).....	12
2.4. Funcionamento das plantas sob estresse atmosférico.....	13
3. OBJETIVO.....	14
3.1. Objetivos específicos.....	14
4. METODOLOGIA.....	15
4.1. Área de estudo.....	15
4.2. Obtenção dos dados.....	16
4.3. Cálculo das taxas demográficas.....	17
4.4. Dados climáticos e obtenção do déficit de pressão de vapor (VPD).....	18
4.5. Modelagem estatística.....	18
4.6. Predições e interpretação ecológica.....	19
5. RESULTADOS.....	19
5.1. Efeito do déficit de pressão de vapor (VPD) na dinâmica florestal.....	19
5.2. Diferenças demográficas entre classes sob VPD baixo e alto.....	21
5.2.1. Mortalidade.....	21
5.2.2. Recrutamento.....	22
5.2.3. Sobrevivência.....	22
6. DISCUSSÃO.....	23
6.1. Influência do clima sobre a dinâmica florestal.....	23
6.2. Mecanismos hidráulicos da árvore relacionados ao aumento da mortalidade sob VPD elevado.....	24
6.3. Heterogeneidade espacial do recrutamento e estabilidade da mortalidade.....	25
6.4. Redução da sobrevivência e implicações para o futuro da floresta.....	25
7. CONCLUSÃO.....	26
8. REFERÊNCIAS.....	27

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas podem modificar processos que sustentam a estrutura e o funcionamento das florestas tropicais (BINKS *et al.*, 2023). A dinâmica florestal, definida pelos padrões de recrutamento, crescimento e mortalidade das árvores, constitui a base para entender mudanças na composição e na organização estrutural ao longo do tempo, sendo conceitos fundamentais para o entendimento ecológico e do manejo de ecossistemas florestais (PHILLIPS *et al.*, 2004). Esses processos regulam a sucessão natural, moldam a distribuição das classes diamétricas e afetam diretamente o estoque de carbono e a manutenção da biomassa florestal (MITCHARD, *et al.*, 2018). Em florestas tropicais, que possuem alta diversidade e competição intensa por recursos (WRIGHT *et al.*, 2002), pequenas variações climáticas podem modificar padrões estruturais e espaciais em escalas de décadas (ROWLAND *et al.*, 2015; DOUGHTY *et al.*, 2015). O estresse climático é um fator que pode influenciar a dinâmica florestal, especialmente em ambientes tropicais sensíveis às variações atmosféricas (ALLEN *et al.*, 2010).

As florestas tropicais são sensíveis às mudanças climáticas porque dependem de condições estáveis de alta umidade e temperatura, e pequenas variações nesses fatores já são suficientes para alterar processos essenciais como fotossíntese, crescimento e sobrevivência (PHILLIPS *et al.*, 2009). Entre os diferentes indicadores climáticos, o déficit de pressão de vapor (VPD) tem se destacado na literatura recente pela sua capacidade de expressar a demanda evaporativa da atmosfera e a intensidade do estresse hídrico ao qual as árvores podem estar expostas (ZHOU, X. *et al.*, 2023; LI *et al.*, 2022). Tendências consistentes de aumento do VPD foram associadas ao aquecimento atmosférico, devido à maior frequência e duração de episódios de estresse hídrico em diferentes regiões do planeta (YUAN *et al.*, 2019). Períodos de seca atmosférica antecedem ou intensificam eventos de mortalidade arbórea, especialmente em florestas tropicais e sazonais (WILLIAMS *et al.*, 2013; ALLEN *et al.*, 2015; ADAMS *et al.*, 2017; CHOAT *et al.*, 2018). A magnitude e os mecanismos desses impactos variam entre regiões e estruturas florestais, o que reforça a necessidade de análises regionais capazes de identificar como diferentes formações respondem ao aumento da seca atmosférica (HAMMOND *et al.*, 2022).

A Mata Atlântica, um hotspot global de biodiversidade, é um dos biomas mais fragmentados e degradados do planeta (HADDAD *et al.*, 2015; PYLES *et al.*, 2022), o que

aumenta a sensibilidade dos remanescentes às variações climáticas (LIMA *et al.*, 2020). Em fragmentos florestais, condições microclimáticas são intensificadas pela criação de bordas, que elevam a entrada de calor, vento e luz, reduzindo a capacidade das árvores de amortecer extremos atmosféricos (MAGNAGO *et al.*, 2015). A estrutura desses remanescentes é regulada pela dinâmica sucessional, marcada pela atuação de diferentes grupos ecológicos: pioneiras, de rápido crescimento e alta rotatividade; secundárias, que sustentam o avanço estrutural; e espécies tardias e de grande porte, responsáveis por grande parte da biomassa e pela regulação microclimática (LUTZ *et al.*, 2018; POORTER *et al.*, 2019; POORTER *et al.*, 2021).

A análise por classes diamétricas é importante para compreender essa trajetória estrutural, pois árvores de tamanhos diferentes respondem de forma distinta às pressões ambientais (RÜGER *et al.*, 2023). Classes inferiores apresentam alta rotatividade e forte sensibilidade a microvariações ambientais (FAN, K *et al.*, 2023), enquanto classes intermediárias representam a transição entre competição intensa e consolidação estrutural (RÜGER *et al.*, 2020). Classes superiores concentram a maior parte da biomassa e mostram maior vulnerabilidade à seca atmosférica e ao aumento da demanda evaporativa, produzindo impactos desproporcionais quando afetadas (BENNETT *et al.*, 2015; LUTZ *et al.*, 2018). Essas diferenças sugerem que a intensificação da seca atmosférica pode alterar a distribuição das pressões demográficas entre classes e, potencialmente, reconfigurar a estrutura diamétrica de fragmentos sob aquecimento acelerado (AGUIRRE-GUTIÉRREZ *et al.*, 2020).

Análises que integrem variações climáticas, classes diamétricas e respostas demográficas ao longo do tempo permitem compreender de que forma esses fatores interagem para alterar os processos sucessionais e a estabilidade dos remanescentes florestais. A investigação dessas relações em fragmentos tropicais é fundamental para avaliar a vulnerabilidade funcional desses sistemas e antecipar mudanças potenciais na estrutura e no funcionamento da floresta diante de cenários de aquecimento climático acelerado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Dinâmica Florestal

A dinâmica florestal resulta da interação entre processos de recrutamento, crescimento, sobrevivência e mortalidade, que determinam a estrutura e o funcionamento de longo prazo das florestas tropicais (WORTHY-SMITH *et al.*, 2019). Esses processos controlam a sucessão, modulam a distribuição de tamanhos e condicionam a renovação da biomassa e da produtividade em ecossistemas (MCDOWELL *et al.*, 2020). Em ambientes neotropicais, diferentes grupos ecológicos coexistem ao longo do gradiente sucessional, compondo mosaicos que variam desde espécies pioneiras de rápido crescimento até tardias com elevada longevidade (RÜGER *et al.*, 2023). Monitoramentos de longo prazo demonstram que variações no balanço entre recrutamento e mortalidade podem alterar a composição funcional das comunidades e provocar mudanças persistentes na estrutura florestal (RÜGER *et al.*, 2023).

Fragmentos mais preservados apresentam maior abundância de espécies tardias e árvores emergentes, enquanto áreas historicamente perturbadas tendem a manter maior proporção de espécies de rápido crescimento (BORGES *et al.*, 2024). Diferenças demográficas também se expressam ao longo do gradiente de tamanhos. Árvores pequenas apresentam alta rotatividade e forte dependência de luz, refletindo competição intensa por recursos, enquanto indivíduos intermediários representam o estágio crítico entre estabelecimento e ascensão ao dossel (COLE *et al.*, 2014). Árvores de grande porte, armazenam grande parte do carbono e exercem forte influência no microclima, mas apresentam maior susceptibilidade a eventos extremos e estresse atmosférico (NEPSTAD *et al.*, 2007).

2.2. Mudanças climáticas em florestas tropicais

As florestas tropicais estão entre os sistemas mais vulneráveis aos efeitos das mudanças climáticas, devido à sua forte dependência de regimes hídricos estáveis e à elevada sensibilidade fisiológica das espécies às variações atmosféricas (TAO *et al.*, 2022). Secas severas associadas ao El Niño provocam aumento substancial na mortalidade de árvores de grande porte na Amazônia, alterando trajetórias estruturais e acelerando a perda de biomassa

(BRANDO *et al.*, 2014). Os eventos de seca estão se tornando mais frequentes e intensos, o que pode comprometer a resiliência funcional de florestas tropicais (BRANDO *et al.*, 2014). Além das secas, o aquecimento atmosférico intensifica estresses fisiológicos ao aumentar a demanda evaporativa e reduzir o balanço hídrico disponível para as árvores (GROSSIORD *et al.*, 2020).

O aquecimento recente está associado a reduções nas taxas de crescimento e ao aumento da mortalidade em diferentes biomas tropicais (MCDOWELL *et al.*, 2020). A diversidade funcional e a estrutura diamétrica também modulam essas respostas, pois grupos sucessionais e classes de tamanho apresentam sensibilidades diferentes à combinação entre alta temperatura e limitação hídrica (SULLIVAN *et al.*, 2020). Na Mata Atlântica, a fragmentação aumenta os efeitos climáticos ao alterar o microclima e intensificar extremos de calor, vento e radiação (MAGNAGO *et al.*, 2015). Essas alterações elevam a vulnerabilidade de árvores de grande porte e favorecem o recrutamento de espécies pioneiras, produzindo trajetórias sucessionais específicas em fragmentos pequenos e degradados (BORGES *et al.*, 2024).

2.3. Temperatura, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor (VPD)

O VPD quantifica o gradiente entre o vapor d'água disponível no ar e o máximo que ele poderia reter sob a mesma temperatura, integrando simultaneamente o efeito térmico e higrométrico sobre o balanço hídrico das plantas (FICKLIN & NOVICK, 2017). Evidências recentes mostram que o VPD tem se destacado como um dos indicadores climáticos mais eficientes para prever mortalidade arbórea em sistemas tropicais, superando variáveis tradicionais como precipitação total e umidade relativa (MEKARNI *et al.*, 2025). O aumento global do VPD nas últimas décadas tem sido amplamente documentado e está associado tanto ao aquecimento atmosférico quanto à redução da umidade relativa em grande parte dos trópicos (YUAN *et al.*, 2019)

Pesquisas em remanescentes da Mata Atlântica indicam que o VPD aumenta próximo às bordas, modificando a fisiologia e intensificando a vulnerabilidade de espécies tardias e árvores estruturais (DE MELLO *et al.*, 2022). Temperatura e umidade relativa também regulam processos-chave como abertura estomática, fluxo transpiratório, uso eficiente da água e balanço energético das folhas. Em ambientes com baixa umidade relativa, o risco de

cavitação aumenta significativamente, especialmente em espécies de dossel expostas a maior radiação (ZIEGLER *et al.*, 2023). Esses mecanismos reforçam que o VPD funciona não apenas como uma métrica climática, mas como um integrador das limitações físicas e fisiológicas que controlam o transporte hídrico nas árvores tropicais.

2.4. Funcionamento das plantas sob estresse atmosférico

O funcionamento das plantas tropicais é controlado por mecanismos hidráulicos e fisiológicos altamente sensíveis às condições atmosféricas (SMITH-MARTIN *et al.*, 2023). A manutenção do fluxo hídrico no xilema é fundamental para sustentar a transpiração e fotossíntese, tornando o balanço hídrico um determinante direto do crescimento e da sobrevivência (ZWENIECKI *et al.*, 2014). Sob valores elevados de déficit de pressão de vapor, a redução da condutância estomática limita a assimilação de carbono, enquanto o aumento da tensão hídrica favorece a cavitação e a ruptura do transporte no xilema (BINKS *et al.*, 2023).

Estratégias funcionais variam amplamente entre grupos ecológicos. Espécies pioneiras tendem a apresentar alta eficiência no uso da água e mecanismos rápidos de resposta ao ambiente, mas menor tolerância à seca prolongada, enquanto espécies tardias e emergentes investem em tecidos lenhosos densos e maior altura, o que aumenta o risco hidráulico sob alta demanda evaporativa (MARKSTEINER *et al.*, 2022). Na Amazônia e em florestas tropicais sazonais, a vulnerabilidade hidráulica está entre os principais mecanismos associados à mortalidade durante eventos climáticos extremos (OLIVEIRA *et al.*, 2021). A interação entre estrutura florestal, composição funcional e variáveis atmosféricas permite identificar quais classes diamétricas e grupos ecológicos são mais suscetíveis à intensificação da secagem atmosférica.

3. OBJETIVO

Avaliar como o déficit de pressão de vapor (VPD) modula os processos demográficos: mortalidade, recrutamento e sobrevivência, em diferentes classes diamétricas de uma floresta de tabuleiro da Mata Atlântica.

3.1. Objetivos específicos

1. Quantificar as taxas de mortalidade, recrutamento e sobrevivência das árvores ao longo do gradiente anual de VPD, considerando a estrutura diamétrica da comunidade arbórea;
2. Comparar como as diferentes classes diamétricas respondem a condições contrastantes de VPD (anos mais úmidos × anos mais secos), identificando mudanças na vulnerabilidade relativa entre classes;
3. Determinar se processos demográficos influenciados pelo VPD resultam em padrões de reorganização estrutural, com possíveis implicações para biomassa, renovação populacional e estabilidade da floresta;
4. Integrar as respostas demográficas observadas em modelos mistos (GLMM) para inferir como as mudanças climáticas pode alterar a dinâmica florestal em escala de fragmento.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

A pesquisa foi conduzida na Reserva Florestal de Linhares (RFL), localizada no norte do estado do Espírito Santo, abrangendo aproximadamente 22.000 hectares entre os municípios de Linhares e Jaguaré (figura 1). A área está situada entre as pontos 19°06' a 19°18' de latitude sul e 39°45' a 40°19' de longitude oeste. O clima da região é classificado como tropical, do tipo Aw segundo Köppen, caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (ALVARES et al., 2013). A média anual de precipitação registrada entre os anos de 1975 e 1995 é de 1.224,3 mm, com temperatura média de 23 °C e umidade relativa do ar em torno de 83,5%. De acordo com Jesus et al. (1992), os solos predominantes na área de estudo pertencem à classe dos Podzólicos Vermelho-Amarelos distróficos, com horizonte B textural de baixa atividade e horizonte A moderado, apresentando variação de textura entre argilosa e areno-argilosa. O relevo é plano, composto por platôs litorâneos com altitudes variando de 28 a 65 metros. A vegetação local é enquadrada como Floresta Estacional Semidecidual de Terras Baixas, conforme a classificação do IBGE (1992).

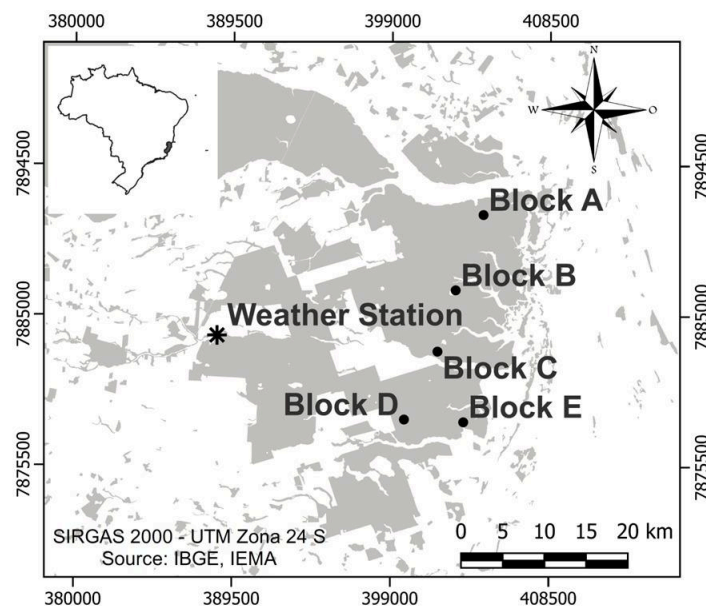


Figura 1. Mapa da área de estudo e localização dos Blocos A–E na Reserva Florestal de Linhares-ES.

4.2. Obtenção dos dados

Em 1980, foi implantado na Reserva Florestal de Linhares, um experimento de manejo florestal, o qual vem sendo monitorado com campanhas realizadas nos anos de 1980, 1983, 1986, 1989, 1992 e 1995, 1997, 1999, 2000, 2002, 2004, 2006, 2013 e 2017. O delineamento experimental adotado foi em blocos ao acaso, composto por nove tratamentos com cinco repetições cada. As unidades experimentais possuem dimensões de 50 × 100 metros, totalizando 0,5 hectare por parcela. Informações detalhadas sobre a instalação do experimento e a descrição dos tratamentos podem ser consultadas em Jesus et al. (1992) e Batista (1994).

Para os fins deste estudo, foi selecionado o tratamento 1, correspondente à condição sem intervenção (testemunha), resultando em cinco parcelas alocadas em áreas de floresta estacional semidecidual em estágio avançado de sucessão. Todas as parcelas foram posicionadas paralelamente a uma estrada de acesso, com distância de 75 metros da borda, a fim de minimizar os efeitos de borda (Jesus et al., 1992). Na avaliação inicial, realizada em 1980, foram incluídos todos os indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 10 cm,

cada um identificado com uma etiqueta numerada e registrado quanto ao seu DAP. Nas campanhas seguintes, árvores que alcançaram esse limite mínimo foram incorporadas ao monitoramento como novos recrutas. Indivíduos ausentes em medições posteriores foram considerados mortos, seguindo os protocolos padrão de parcelas permanentes.

Ao longo do monitoramento, cada árvore foi acompanhada quanto à identidade botânica, DAP, parcela de ocorrência e estado (viva ou morta). As informações foram organizadas em intervalos entre anos consecutivos de medição, possibilitando a quantificação, para cada parcela e período, de quatro variáveis essenciais:

- N_0 – número de indivíduos vivos no início do intervalo;
- N_t – número de indivíduos vivos ao final;
- M – número de mortes;
- R – número de recrutas (indivíduos que atingiram $DAP \geq 10$ cm no período).

Essas métricas permitiram o cálculo das taxas anuais de mortalidade, recrutamento e sobrevivência, utilizadas como base para a análise demográfica ao longo da série temporal.

4.3. Cálculo das taxas demográficas

Os indivíduos foram agrupados em três classes diamétricas: Classe I ($10 \text{ cm} \leq DAP < 30 \text{ cm}$), Classe II ($30 \text{ cm} \leq DAP < 60 \text{ cm}$) e Classe III ($DAP \geq 60 \text{ cm}$). As taxas demográficas foram estimadas por meio das fórmulas propostas por Primack et al. (1985), utilizadas em estudos de dinâmica florestal. Os cálculos foram realizados para cada classe diamétrica, parcela e intervalo temporal.

Taxa de mortalidade anual (m):

$$m = 1 - \left(\frac{N_t}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}}$$

Taxa de recrutamento anual (r):

$$r = \left(\frac{N_0 + R}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1$$

Taxa de sobrevivência anual (s):

$$s = \left(\frac{N_t}{N_0} \right)^{\frac{1}{t}}$$

N_0 = número de indivíduos vivos no início do intervalo

N_t = número de indivíduos vivos no final do intervalo

t = duração do intervalo (anos)

4.4. Dados climáticos e obtenção do déficit de pressão de vapor (VPD)

Para avaliar a sensibilidade demográfica sob extremos climáticos, foram geradas estimativas marginais para dois níveis de VPD anual: baixo (VPD = 0.3553) e alto (VPD = 0.5139), representando condições úmidas e secas, respectivamente. Diferenças entre classes foram avaliadas por contrastes pareados com correção de Bonferroni. O VPD anual médio expresso em quilopascal (kPa), foi utilizado como variável climática principal, por ser um indicador direto da demanda evaporativa da atmosfera e do estresse hídrico atmosférico. Foram utilizadas séries históricas anuais provenientes da estação meteorológica da Reserva Florestal de Linhares, calculadas a partir de:

$$VPD = es - ea$$

es = pressão de saturação do vapor d'água (função da temperatura).

ea = pressão atual do vapor d'água (derivada da umidade relativa).

Para cada intervalo entre medições, o valor anual de VPD correspondente foi associado às parcelas, permitindo relacioná-lo às taxas demográficas observadas.

4.5. Modelagem estatística

As análises foram conduzidas utilizando modelos lineares generalizados mistos (GLMM) para estimar os efeitos das classes funcionais de espécies e do déficit de pressão de vapor (VPD) sobre três processos demográficos: mortalidade, recrutamento e crescimento. Os modelos foram ajustados com distribuição binomial para mortalidade e recrutamento e distribuição Gamma (com *log link*) para crescimento. Para avaliar a sensibilidade demográfica sob extremos climáticos, foram geradas estimativas marginais para dois níveis de VPD anual: baixo (VPD = 0.3553) e alto (VPD = 0.5139), representando condições

úmidas e secas, respectivamente. Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2025). A estrutura geral do modelo foi:

$$\text{Taxa demográfica} \sim \text{VPD} \times \text{classe diamétrica} + (1|\text{Parcela})$$

VPD = efeito fixo contínuo;

classe diamétrica = efeito fixo categórico;

VPD $\times$ classe = interação testada;

Parcela = efeito aleatório para controlar pseudorrepetição espacial e dependência temporal.

4.6. Predições e interpretação ecológica

Para interpretar os efeitos do VPD em cada classe diamétrica, foram estimadas: predições ajustadas ao longo do gradiente contínuo de VPD; comparações entre classes sob VPD alto e baixo; contrastes entre anos de maior secagem atmosférica e anos mais úmidos e estimativas marginais (EMMs) para visualizar padrões demográficos. Essas análises permitiram identificar diferenças na sensibilidade climática entre árvores pequenas, intermediárias e de grande porte, bem como avaliar potenciais trajetórias de reorganização estrutural do fragmento diante da intensificação da seca atmosférica.

5. RESULTADOS

5.1. Efeito do déficit de pressão de vapor (VPD) na dinâmica florestal

Os resultados do GLMM indicam que o VPD exerce influência significativa sobre a dinâmica da floresta (figura 2 e tabelas 1-3). Para mortalidade, observou-se efeito significativo do incremento de VPD ($\beta = 5.096$; $p = 0.024$), revelando maior probabilidade de morte com o aumento da seca e temperatura. A sobrevivência apresentou o padrão inverso ($\beta = -5.096$; $p = 0.024$), confirmando a forte influência do estresse atmosférico.

O efeito das classes diamétricas revelou que, em condições médias e baixas de VPD, árvores grandes (Classe III) apresentam menor mortalidade que indivíduos pequenos (Classe I). Entretanto, a interação VPD $\times$ Classe III foi significativa ($\beta = 9.470$; $p = 0.0054$), indicando que a vantagem das árvores grandes se perde quando o déficit atmosférico

aumenta, resultando em forte aumento de vulnerabilidade dos indivíduos de grande porte sob aumento de temperatura e de seca atmosférica.

O recrutamento não apresentou relação significativa com VPD, mas mostrou padrão estrutural: classes maiores apresentaram maiores taxas de entrada do que classes pequenas, independentemente das condições climáticas.

Tabelas 1-3. Resultados dos modelos lineares mistos generalizados (GLMM) ajustados para avaliar os efeitos do déficit de pressão de vapor (VPD) e das classes diamétricas sobre a dinâmica populacional da comunidade arbórea. São apresentados os coeficientes (β), erros-padrão (SE), valores z e níveis de significância (p) para mortalidade (Tabela 1), recrutamento (Tabela 2) e sobrevivência (Tabela 3), considerando Plot como efeito aleatório.

Mortalidade	β	SE	z	p
Intercepto	-5,5727	0,9801	-5,686	$1,3 \times 10^{-8}$ ***
VPD (ano)	5,0963	2,2597	2,255	0,024115 *
Classe II	-0,5004	1,5073	-0,332	0,739919
Classe III	-4,9532	1,4753	-3,358	0,000786 ***
VPD $\times$ Classe II	-0,2998	3,5099	-0,085	0,931936
VPD $\times$ Classe III	9,4703	3,4051	2,781	0,005416 **

Efeitos aleatórios: Plot (Intercepto) - Variância = $1,141 \times 10^{-9}$; DP = $3,377 \times 10^{-5}$.

Recrutamento	β	SE	z	p
Intercepto	-1,6232	0,6829	-2,377	0,01745 *
VPD (ano)	-0,9051	1,6022	-0,565	0,57212
Classe II	1,5699	0,8437	1,861	0,06280 .
Classe III	2,5468	0,8497	2,997	0,00272 **
VPD $\times$ Classe II	-0,3107	1,9828	-0,157	0,87549
VPD $\times$ Classe III	-0,2810	1,995	-0,141	0,888

Efeitos aleatórios: Plot (Intercepto) - Variância = 0,009274; DP = 0,0963

Sobrevivência	β	SE	z	p
Intercepto	5,5727	0,9801	5,686	$1,3 \times 10^{-8}$ ***
VPD (ano)	-5,0964	2,2597	-2,255	0,024115 *

Classe II	0,5004	1,5073	0,332	0,73992
Classe III	4,9532	1,4753	3,358	0,000786 ***
VPD × Classe II	0,2998	3,5099	0,085	0,931935
VPD × Classe III	-9,4703	3,4051	-2,781	0,005416 **

Efeitos aleatórios: Plot (Intercepto) - Variância = $1,165 \times 10^{-9}$; DP = $3,413 \times 10^{-5}$

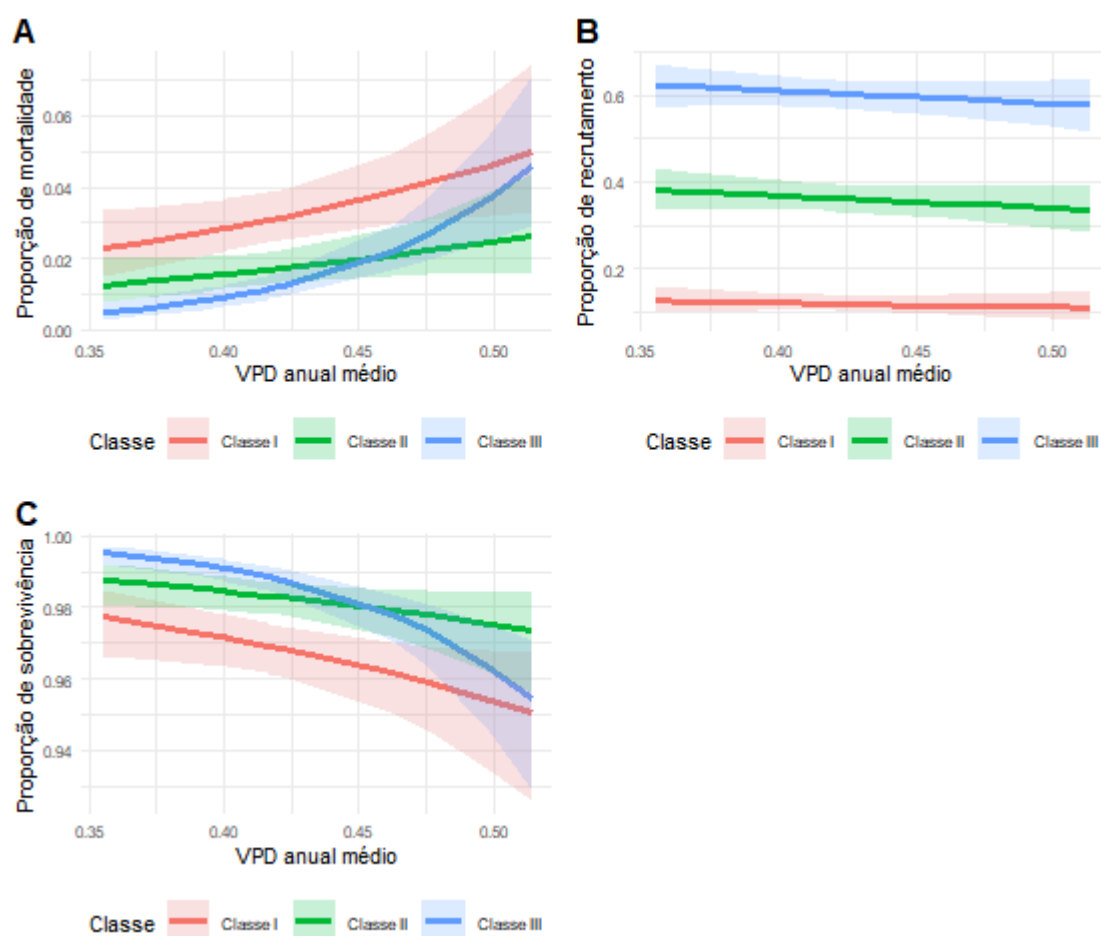


Figura 2. Efeitos do déficit de pressão de vapor (VPD) sobre mortalidade, recrutamento e sobrevivência em três classes diamétricas. As curvas mostram as estimativas marginais obtidas pelos GLMMs, ajustadas para as demais covariáveis. Faixas sombreadas indicam intervalos de confiança de 95%.

5.2. Diferenças demográficas entre classes sob VPD baixo e alto

5.2.1. Mortalidade

Sob condições de VPD baixo, a mortalidade apresentou o padrão esperado entre as classes diamétricas, com valores significativamente maiores na Classe I, intermediários na Classe II e menores na Classe III (Figura 3 e Tabelas 1-3). Todas as comparações entre classes foram estatisticamente significativas, mantendo o gradiente clássico observado em condições mais úmidas.

Quando o VPD foi alto, esse padrão se modificou (Figura 3 e Tabelas 1-3). As diferenças entre a Classe II e a Classe III deixaram de ser significativas, indicando que, nesses anos, ambas apresentaram estimativas de mortalidade estatisticamente semelhantes. Nessa condição, apenas a Classe I permaneceu distinta das demais, enquanto as classes intermediária e superior deixaram de diferir entre si, alterando o gradiente observado em anos de menor demanda evaporativa.

5.2.2. Recrutamento

O recrutamento apresentou o mesmo padrão hierárquico sob diferentes condições atmosféricas, mantendo valores maiores na Classe III, intermediários na Classe II e menores na Classe I, tanto em anos de VPD baixo quanto de VPD alto (Figura 3 e Tabelas 1-3). As diferenças entre as classes permaneceram estatisticamente significativas em ambos os cenários, indicando que a ordem relativa entre os grupos diamétricos não se altera com a variação no VPD. Assim, mesmo sob aumento da demanda evaporativa, as estimativas de recrutamento mantiveram a mesma estrutura observada em condições mais úmidas.

5.2.3. Sobrevivência

A sobrevivência apresentou o mesmo padrão observado para a mortalidade. Em condições de VPD baixo, as classes diamétricas diferiram significativamente entre si, com maiores valores de sobrevivência na Classe III, intermediários na Classe II e menores na Classe I (Figura 3 e Tabelas 1-3). Sob VPD alto, o padrão se alterou: as Classes II e III deixaram de diferir estatisticamente, indicando sobrevivência semelhante entre ambas (Figura 3 e Tabelas 1-3). Assim, somente a Classe I manteve valores significativamente inferiores em relação às demais, enquanto as classes intermediária e superior deixaram de apresentar diferenças entre si nos anos de maior demanda evaporativa.

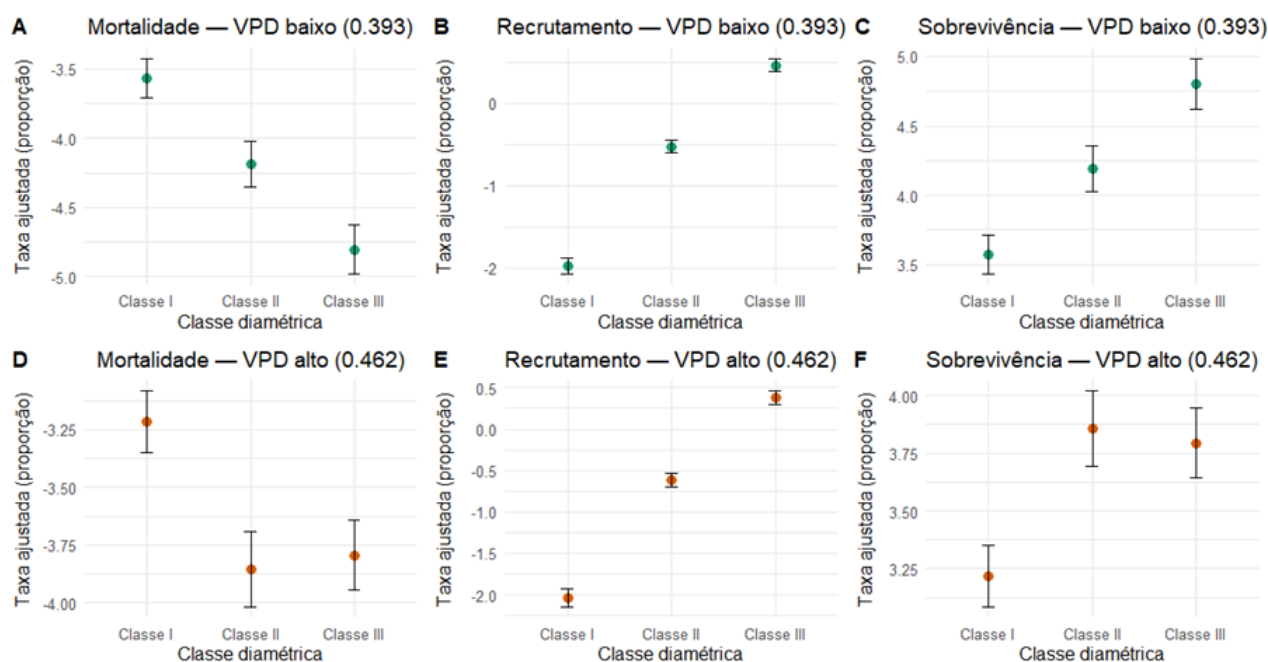


Figura 3. Diferenças marginais entre classes diamétricas (I, II e III) para mortalidade, recrutamento e sobrevivência sob dois regimes contrastantes de déficit de pressão de vapor (VPD baixo = 0,393 kPa; VPD alto = 0,462 kPa). Valores representam contrastes pareados (estimativas $\pm$ erro-padrão) obtidos a partir dos GLMMs. Sob VPD baixo, mantém-se o gradiente ontogenético clássico; sob VPD alto, a distinção entre classes intermediárias e superiores desaparece para mortalidade e sobrevivência.

6. DISCUSSÃO

6.1. Influência do clima sobre a dinâmica florestal

Compreender as mudanças climáticas, principalmente sobre eventos de seca e aumento da temperatura, nos processos demográficos de populações arbóreas é fundamental para prever a resistência e a resiliência das florestas tropicais diante do avanço das mudanças climáticas (ROWLAND *et al.*, 2015; McDOWELL *et al.*, 2018; ANDEREGG *et al.*, 2020). Os resultados desse estudo, por meio de um longo monitoramento da dinâmica florestal na Mata Atlântica (1980–2017), mostram que a variação no VPD impacta, com diferentes magnitudes, as diferentes classes diamétricas de árvores tropicais. Isso é especialmente relevante porque cada classe de tamanho desempenha funções ecológicas distintas e alterações em sua dinâmica afetam diretamente o estoque de carbono e a capacidade de regeneração da floresta (POORTER *et al.*, 2015).

Em condições de VPD baixo, associadas a maior umidade atmosférica e menores temperaturas, as taxas de dinâmica seguem o gradiente clássico de tamanho, com maior mortalidade e menor sobrevivência em indivíduos pequenos e vantagens demográficas nas classes diamétricas superiores. Contudo, sob VPD alto, esse padrão muda: mortalidade e sobrevivência convergem entre a classe intermediária e ainda mais forte na classe superior, indicando que o estresse atmosférico diminui a sobrevivência e aumenta drasticamente a mortalidade das grandes árvores da Mata Atlântica. Em conjunto, esses resultados evidenciam o VPD como um modulador atmosférico-chave, capaz de remodelar a dinâmica populacional estruturada por tamanho das árvores (BENNETT *et al.*, 2015; ESQUIVEL-MUELBERT *et al.*, 2019; ANDEREGG *et al.*, 2020).

6.2. Mecanismos hidráulicos da árvore relacionados ao aumento da mortalidade sob VPD elevado

A elevação do VPD esteve associada ao aumento da mortalidade, refletindo a maior dificuldade das árvores em manter a coluna hídrica quando a atmosfera exige fluxos transpiratórios mais intensos. O déficit de pressão de vapor atua como um regulador central da dinâmica demográfica, intensificando o estresse hidráulico e reorganizando a distribuição de vulnerabilidade entre classes diamétricas (NOVICK *et al.*, 2016). Em condições secas, a redução da condutância estomática limita a reposição de água no xilema, favorecendo a perda de condutividade e a formação de embolias, mecanismos que se intensificam à medida que o déficit atmosférico aumenta (CHOAT *et al.*, 2018). Assim, vimos que, de maneira geral, as populações arbóreas estudadas foram negativamente afetadas pelo aumento do VPD atmosférico, o que pode impactar drasticamente na capacidade de estocar e sequestrar carbono pela biomassa florestal.

As árvores de grande porte foram as mais afetadas pelo aumento do VPD. Isso pode ser explicado pelo risco ampliado de falha hidráulica quando a demanda evaporativa se eleva (CHOAT *et al.*, 2018). Árvores grandes precisam sustentar colunas mais longas de água, o que aumenta o gradiente de tensão no xilema e eleva a probabilidade de cavitação em períodos de seca atmosférica (BENNETT *et al.*, 2015; LUTZ *et al.*, 2018). A convergência entre classes intermediárias e superiores sob VPD alto indica que a vantagem estrutural típica das árvores grandes diminui conforme o estresse atmosférico aumenta, caracterizando um

padrão de vulnerabilidade dependente do tamanho, condição essa já observada em florestas tropicais submetidas a secas intensas (MEIR *et al.*, 2018).

6.3. Heterogeneidade espacial do recrutamento e estabilidade da mortalidade

A variância foi muito maior para o recrutamento (tabelas 1-3) mostrando que a entrada de novos indivíduos varia entre as parcelas. Isso acontece porque o recrutamento depende de fatores locais, como a presença de árvores grandes que atuam como matrizes, diferenças de microclima no sub-bosque, pequenas aberturas no dossel e o histórico de distúrbios (PILLAY *et al.*, 2018; GRATZER *et al.*, 2018; ZAHAVI *et al.*, 2021). Por outro lado, a variação espacial da mortalidade foi menor no conjunto de dados analisados, sugerindo que esse processo pode responder de forma mais homogênea ao estresse causado pelo VPD, possivelmente por envolver mecanismos fisiológicos semelhantes entre parcelas. Ainda assim, essa interpretação deve ser vista com cautela, já que padrões espaciais de mortalidade podem depender de outros fatores não estudados aqui. Essa diferença entre os processos da dinâmica florestal indica que a reposição de árvores não ocorre de maneira homogênea.

6.4. Redução da sobrevivência e implicações para o futuro da floresta

A sobrevivência reduziu-se significativamente com o aumento do VPD, acompanhando o padrão esperado frente à intensificação do estresse hídrico. Ainda que o VPD represente um fator limitante para plântulas sensíveis à desidratação, a ausência de respostas sugere que mecanismos regulados pelo dossel, como sombreamento, umidade local e amortecimento térmico, reduzem o impacto direto das oscilações atmosféricas sobre a entrada de novos indivíduos (MAGNAGO *et al.*, 2015). À medida que o déficit atmosférico aumenta, o balanço hídrico das árvores se torna mais negativo, reduzindo a integridade hidráulica e ampliando a vulnerabilidade ao colapso de condução (CHOAT *et al.*, 2018). Esses mecanismos mostram que, embora o dossel possa suavizar parte do estresse atmosférico, o aumento contínuo do VPD ultrapassa essa capacidade de amortecimento, levando a uma queda na sobrevivência das árvores.

Árvores grandes apresentaram forte redução de sobrevivência em anos secos, o que indica maior sensibilidade ao estresse evaporativo. Secas atmosféricas elevam a diferença entre perda hídrica e reposição via solo, e indivíduos de grande porte enfrentam limitações estruturais que afetam sua capacidade de manter fluxos transpiratórios elevados sob tensão

(BINKS *et al.*, 2023). Árvores de grande porte concentram biomassa e assim o carbono florestal (SLIK *et al.*, 2013; LUTZ *et al.*, 2018), seu declínio tende a desencadear cascatas funcionais que incluem redução do estoque de carbono e causando intensificação do calor no sub-bosque (SULLIVAN *et al.*, 2020; TAO *et al.*, 2022). A convergência entre classes intermediárias e superiores no regime seco mostra que a vantagem hidráulica normalmente associada ao porte elevado é anulada quando o ambiente atmosférico se torna mais limitante. A combinação entre maior mortalidade de árvores grandes, estabilidade do recrutamento e redução da sobrevivência sob atmosfera seca aponta para risco de reorganização estrutural significativa em fragmentos de Mata Atlântica. Essas condições, de mortalidade acentuada das grandes árvores, pode reduzir as capacidade de estocar carbono, mudando assim o papel funcional das florestas, tornando-as uma fonte de emissão de CO₂.

7. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo mostram que o déficit de pressão de vapor (VPD) é um fator determinante para a dinâmica da floresta analisada. Embora todas as classes diamétricas responderam ao aumento do VPD, as árvores da Classe III, foram as que apresentaram maior sensibilidade ao estresse atmosférico, com aumento expressivo da mortalidade em anos mais secos. Em condições de VPD baixo, árvores grandes mantêm a vantagem demográfica esperada, apresentando menor mortalidade e maior sobrevivência em relação às demais classes. No entanto, quando o VPD aumenta, essa vantagem desaparece, a Classe III passa a mostrar mortalidade semelhante ou até maior que árvores menores, revelando que o estresse hídrico atmosférico reduz a resistência dos indivíduos de grande porte.

Esse padrão indica que mudanças climáticas que elevam o VPD podem comprometer diretamente a estrutura da floresta, afetando principalmente as árvores maiores, fundamentais para a manutenção da biomassa, dos estoques de carbono e da estabilidade ecológica. Assim, a vulnerabilidade da Classe III sob secas atmosféricas reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de estratégias de conservação que considerem a crescente influência do clima sobre a dinâmica florestal da Mata Atlântica.

8. REFERÊNCIAS

- ADAMS, H. D. et al.** A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, p. 1285–1291, 2017.
- ALVARES, C. A. et al.** Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- AGUIRRE-GUTIÉRREZ, J. et al.** Long-term droughts may drive drier tropical forests towards tipping points. *Nature Communications*, v. 11, p. 3450, 2020.
- ALLEN, C. D. et al.** A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate risks for forests. *Forest Ecology and Management*, v. 259, p. 660–684, 2010.
- ANDEREGG, W. R. L. et al.** Tree mortality from drought, insects, and their interactions in a changing climate. *New Phytologist*, v. 208, n. 3, p. 674–683, 2015. DOI: 10.1111/nph.13477.
- ANDEREGG, W. R. L. et al.** Meta-analysis reveals that hydraulic traits explain cross-species variation in drought-induced mortality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 113, n. 18, p. 5024–5029, 2016. DOI: 10.1073/pnas.1525678113.
- ANDEREGG, W. R. L. et al.** Climate-driven risks to the climate mitigation potential of forests. *Science*, v. 368, eaaaz7005, 2020.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al.** 21st century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, v. 9, n. 1, p. 536, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y.
- BENNETT, A. C. et al.** Larger trees suffer most during drought in forests worldwide. *Global Change Biology*, v. 21, p. 1904–1914, 2015.
- BINKS, O. et al.** Vapour pressure deficit modulates hydraulic function and structure of tropical rainforests under non-limiting soil water supply. *New Phytologist*, v. 240, p. 1405–1420, 2023.
- BORGES, É. R. et al.** Long-term change in the tree community of a tropical forest remnant surrounded by human-modified landscapes. *Folia Geobotanica*, v. 59, p. 51–62, 2024. DOI: 10.1007/s12224-024-09450-z.
- BRANDO, P. M. et al.** Abrupt increases in Amazonian tree mortality due to drought–fire interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 111, p. 6347–6352, 2014.
- CHOAT, B. et al.** Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, v. 558, p. 531–539, 2018.
- COLE, L. E. S.; BHAGWAT, S. A.; WILLIS, K. J.** Recovery and resilience of tropical forests after disturbance. *Nature Communications*, v. 5, art. 3906, 2014. DOI: 10.1038/ncomms4906.

DOUGHTY, C. E. et al. Drought impact on forest dynamics and carbon cycling in the Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 112, p. 2934–2939, 2015.

ESQUIVEL-MUELBERT, A. et al. Compositional response of Amazon forests to climate change. *Global Change Biology*, v. 26, p. 2954–2967, 2020.

FAN, K. et al. The turnover dynamics of woody plants in a tropical lowland rain forest during recovery following anthropogenic disturbances. *Journal of Environmental Management*, v. 342, art. 118371, 2023. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118371.

FICKLIN, D. L.; NOVICK, K. A. Historic and projected changes in vapor pressure deficit suggest a continental-scale warming-induced drying of the United States atmosphere. *Environmental Research Letters*, v. 12, p. 054001, 2017.

GRATZER, G. et al. Seed dispersal, microsites or competition—what drives gap regeneration in an old-growth forest? *Forests*, v. 9, n. 5, art. 230, 2018. DOI: 10.3390/f9050230.

GROSSIORD, C. et al. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, v. 226, p. 1550–1566, 2020.

HAMMOND, W. M. et al. Global field observations of tree die-off reveal hotter-drought fingerprint for Earth's forests. *Nature Communications*, v. 13, art. 1761, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-29289-2.

LIMA, R. A. F. et al. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. *Nature Communications*, v. 11, art. 6347, 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-20217-w.

LUTZ, J. A. et al. Global importance of large-diameter trees. *Global Ecology and Biogeography*, v. 27, p. 849–864, 2018.

MAGNAGO, L. F. S. et al. Microclimatic conditions at forest edges have significant impacts on vegetation structure in large Atlantic forest fragments. *Biodiversity and Conservation*, v. 24, n. 9, p. 2305–2318, 2015. DOI: 10.1007/s10531-015-0961-1.

MARKSTEINER, T. et al. Coordination between wood density, drought tolerance and hydraulic safety in tropical successional groups. *New Phytologist*, v. 236, p. 1440–1454, 2022.

MCDOWELL, N. et al. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science*, v. 368, eaaz9463, 2020.

MCDOWELL, N. G. et al. Mechanisms of plant survival and mortality during drought: why do some plants live while others die? *New Phytologist*, v. 219, p. 5–36, 2018.

- MEIR, P.; MENCUCCINI, M.; DEWAR, R. C.** Drought-related tree mortality: addressing the gaps in understanding and prediction. *New Phytologist*, v. 207, n. 1, p. 28–33, 2015. DOI: 10.1111/nph.13382.
- MEKARNI, L. et al.** Acclimation to high vapor pressure deficit in warmer air can reduce tree vulnerability to drought-induced mortality. *Plant, Cell & Environment*, v. 48, n. 7, p. 4997–5008, 2025. DOI: 10.1111/pce.15490.
- MITCHARD, E. T. A.** The tropical forest carbon cycle and climate change. *Nature*, v. 559, p. 527–534, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0300-2.
- NEPSTAD, D. C. et al.** Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, v. 88, p. 2259–2269, 2007.
- NOVICK, K. A. et al.** The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nature Climate Change*, v. 6, p. 1023–1027, 2016.
- PHILLIPS, O. L. et al.** Pattern and process in Amazon tree turnover 1976–2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, v. 359, n. 1443, p. 381–407, 2004. DOI: 10.1098/rstb.2003.1438.
- PHILLIPS, O. L. et al.** Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, v. 323, p. 1344–1347, 2009.
- PILLAY, T. et al.** Multiple stages of tree seedling recruitment are altered in tropical forests degraded by selective logging. *Ecology and Evolution*, v. 8, n. 19, p. 9582–9594, 2018. DOI: 10.1002/ece3.4480.
- POORTER, L. et al.** Diversity enhances carbon storage in tropical forests. *Nature*, v. 562, p. 629–634, 2019.
- POORTER, L. et al.** Multidimensional tropical forest recovery. *Science*, v. 374, p. 1370–1376, 2021.
- R CORE TEAM.** R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024.
- ROWLAND, L. et al.** Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation. *Nature*, v. 528, p. 119–122, 2015.
- RÜGER, N. et al.** Demographic trade-offs predict tropical forest dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 115, p. 2700–2705, 2020.
- RÜGER, N. et al.** Successional shifts in tree demographic strategies in wet and dry Neotropical forests. *Global Ecology and Biogeography*, v. 32, n. 6, p. 1002–1014, 2023. DOI: 10.1111/geb.13669.
- SMITH-MARTIN, C. M. et al.** Hydraulic variability of tropical forests is largely independent of water availability. *Ecology Letters*, v. 26, p. 1829–1839, 2023.
- SULLIVAN, M. J. P. et al.** Long-term thermal sensitivity of tropical forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 117, p. 3240–3247, 2020.

TAO, S. et al. Increasing and widespread vulnerability of intact tropical forests to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 119, e2116626119, 2022.

WILLIAMS, A. P. et al. Temperature as a potent driver of forest drought stress and tree mortality. *Nature Climate Change*, v. 3, p. 292–297, 2013.

WORTHY-SMITH, S. J. et al. Functional perspectives on tropical tree demography and forest change. *Ecological Processes*, v. 8, p. 4, 2019.

WRIGHT, S. J. Plant diversity in tropical forests: a review of mechanisms of species coexistence. *Oecologia*, v. 130, p. 1–14, 2002.

YUAN, W. et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, v. 5, eaaax1396, 2019.

ZAHAVI, E. et al. Proximity and abundance of mother trees shape the spatial structure of seedling recruitment in tropical forests. Zurich: ETH Zürich Research Collection, 2021.

ZHOU, X. et al. Significant increases in water vapor pressure correspond with climate warming globally. *Water*, v. 15, n. 18, art. 3219, 2023. DOI: 10.3390/w15183219.

ZIEGLER, C. et al. Large leaf hydraulic safety margins limit the risk of drought-induced leaf hydraulic dysfunction in Neotropical rainforest canopy tree species. *Functional Ecology*, v. 37, n. 6, p. 1717–1731, 2023. DOI: 10.1111/1365-2435.14325.

ZWIENIECKI, M. A.; SECCHI, F. Threats to xylem hydraulic function of trees under ‘new climate normal’ conditions. *Plant, Cell & Environment*, v. 38, n. 9, p. 1713–1724, 2014. DOI: 10.1111/pce.12412.