

RESPOSTAS DEMOGRÁFICAS DO SUB-BOSQUE EM UMA FLORESTA TROPICAL A UM EVENTO DE SECA

Autores: Gabriel Mendonça Lack¹, Renan Köpp Hollunder², Luciana Aparecida Botacim^{1,3} & Mário Luís Garbin^{1,3}.

¹Universidade Federal do Espírito Santo (Campus de Alegre), Alto universitário, S/N, Guararema, Alegre – ES, 29500-000, lackgabriel.m@gmail.com, lucianabotacim@gmail.com, mario.garbin@ufes.br.

²Maple Bear Cachoeiro, Rua Amélia Molinaroli Giró, 57 – São Geraldo, Cachoeiro de Itapemirim – ES, 29314-673, renanhollunder@gmail.com.

³Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, UENF, Avenida Alberto Lamego, 2000 – Parque California, Campos dos Goytacazes – RJ, 28013-602, lucianabotacim@gmail.com, mario.garbin@ufes.br

Resumo

As secas têm se tornado mais comuns e intensas, influenciando a regeneração e a mortalidade de plantas. Este estudo investigou a resiliência do sub-bosque de uma floresta tropical após o El Niño 2015-2016 em quatro janelas temporais: 2013-2017, 2017-2019, 2019-2022 e 2022-2024. Foram analisados o recrutamento, a mortalidade e a estrutura da comunidade em quatro habitats topográficos distintos. Os padrões demográficos variaram entre as janelas temporais. Nos habitats de top de morro, houve maiores taxas de mortalidade pós-seca (2017-2019), seguidas pelo maior pico de recrutamento na janela seguinte (2019-2022) apontando para uma recuperação pós-evento de seca. A baixada apresentou um aumento da mortalidade (~6%) e uma queda no recrutamento na janela mais recente (2022-2024), indicando uma perturbação recente. Essa inversão aponta para a complexa recuperação pós-seca e a importância dos monitoramentos de longo prazo para entender os mecanismos de resiliência de florestas tropicais.

Palavras-chave: El Niño. Gradiente topográfico. Mata Atlântica. Demografia. Resiliência à seca.

Área do Conhecimento: Ciências Biológicas

Introdução

O El Niño-Oscilação Sul (ENSO) é um fenômeno natural associado às mudanças nos padrões de vento e temperatura da superfície do mar (IPCC, 2023). No período de 2015 a 2016, a Floresta Atlântica foi impactada por secas severas associadas ao ENSO (Slik, 2004; Kogan e Guo, 2017). Esse fenômeno tem se intensificado em duração, severidade e frequência devido às mudanças climáticas, levando a eventos extremos de seca (IPCC, 2023).

A seca modifica a composição e abundância de espécies, alterando o funcionamento dos ecossistemas (Boeck et al., 2017). Identificar os fatores induzidos pela seca relacionados à mortalidade e ao recrutamento de plantas ajudará a compreender a resiliência dessas florestas. Podemos definir resiliência, como a capacidade de um ecossistema de resistir e se recuperar dos efeitos causados pela estiagem (Zhang et al., 2024). Já a resistência, é a capacidade do sistema de manter suas propriedades e funções durante um distúrbio (Mariotte et al., 2013).

A intensidade da seca varia conforme a heterogeneidade topográfica, sendo maior nos vales e menor nos topos, o que se reflete também no sub-bosque (Fyllas et al., 2017). Essa variação pode ser organizada em três habitats principais: vales, encostas e topos de morro (Hollunder et al., 2022). Em escala local, o microclima e a disponibilidade de água diferem dentro do ambiente de sub-bosque ao longo de gradientes topográficos (Fyllas et al., 2017). Ambientes de vale resistem melhor a distúrbios, pois, possuem um dossel denso que auxilia na retenção de água e na fertilidade do solo (Hollunder et al., 2021). Entretanto, topos de morro são habitats mais quentes, com indivíduos possuindo menor área foliar, resultando em um dossel pouco denso e maior entrada de luz (Fujimoto et al., 2024). Áreas

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

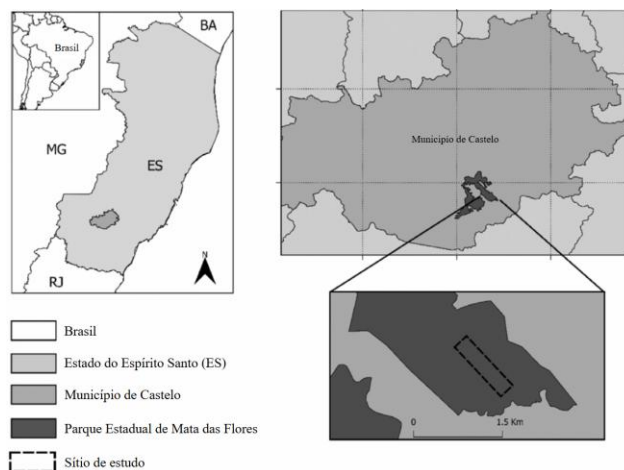
inclinadas, por sua vez, apresentam menor umidade, em função do grau de inclinação e da exposição solar de sua vertente. (Hollunder et al., 2021). Tais variações indicam como a heterogeneidade do terreno influencia a composição das comunidades de sub-bosque.

Este estudo tem como objetivo compreender melhor a resiliência de florestas tropicais às mudanças climáticas, avaliando recrutamento e mortalidade de plantas do sub-bosque em diferentes períodos pós-seca. Espera-se que haja maior recrutamento e menor mortalidade nos habitats de baixada, em relação a encostas e topos, com um padrão geral de recuperação ao longo do gradiente topográfico.

Metodologia

O Parque Estadual Mata das Flores (Figura 1) está localizado no município de Castelo, ES, estando inserido no bioma Mata Atlântica. O local de estudo abrange aproximadamente 100 hectares e está situado ao longo de um gradiente topográfico que vai desde um habitat de vale, elevando-se a topos de morro (Hollunder et al., 2021).

Figura 1: Localização do sítio de estudo indicado com o tracejado dentro do Parque Estadual de Mata das Flores no município de Castelo no estado do Espírito Santo.



Fonte: Modificado de Hollunder et al., 2021.

O desenho foi estabelecido em 2013, englobando 50 parcelas. Cada parcela possui dimensões de 10 m x 10 m e está disposta aos pares com 10 m de espaçamento lateral entre si e 20 m de distância entre os pares, das quais foram selecionadas 20 parcelas que melhor representam a topografia local, segundo Hollunder et al. (2021).

O gradiente topográfico é dividido em: topo de morro, baixada, inclinado noroeste e inclinado sudoeste. Em 2017, ao final da seca de 2015 e 2016, foram realizadas novas amostragens da área de estudo. Registrados o diâmetro da altura do peito (DAP) e a identificação dos novos indivíduos (Hollunder et al., 2021). O monitoramento continuou nos anos de 2019 e 2022, identificando e documentando plantas mortas e recrutadas com DAP ≥ 1 . Entre abril e setembro de 2024, a coleta de dados do sub-bosque do Parque Estadual de Mata das Flores foi realizada em campo.

Foram registrados 1770 indivíduos, distribuídos em diferentes estratos topográficos, conforme ilustrado na Figura 1. O DAP de cada planta foi medido com paquímetro analógico e fita métrica, e ramos foram coletados para identificação dos indivíduos recrutados. Indivíduos caídos, sem brotos ou ausentes, foram classificados como mortos (Itoh et al., 2012).

Comentado [U1]: seria melhor juntar essas duas partes, pois, a referência de sua pesquisa é do mesmo autor. Deixar mais compreensível essa parte do texto. Sugestão: "O desenho foi estabelecido em 203 englobando 50 parcelas, sendo que, cada parcela possui dimensões de 10m X 10m estando disposta em pares com 10m de espaçamento lateral entre si e 20m de distância entre os pares, o qual foram selecionadas 20 parcelas que melhor representam a topografia, segundo Hollunder et. Al (2021).

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

No Laboratório de Botânica da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), os dados foram tabulados e utilizados para contabilizar mortalidade e recrutamento em 2024, sendo comparados aos levantamentos de 2017, 2019 e 2022.

Para análise da mortalidade e recrutamento, foram comparadas as janelas temporais de 2017, 2019, 2022 e 2024, calculando as taxas de recrutamento (Rolim et al., 2005) e de mortalidade para cada intervalo entre os levantamentos (Hollunder et al., 2021). O cálculo de recrutamento (R) é definido por (Equação 1):

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

Sendo, N_0 número de árvores vivas no início do intervalo, N_r , o número de árvores que foram recrutadas e t é o número de anos. Já para o cálculo da taxa média de mortalidade (M), tem-se (Equação 2):

$$M = \left\{ 1 - \left(\frac{N_0 - m}{N_0} \right)^{1/t} \right\} \quad (2)$$

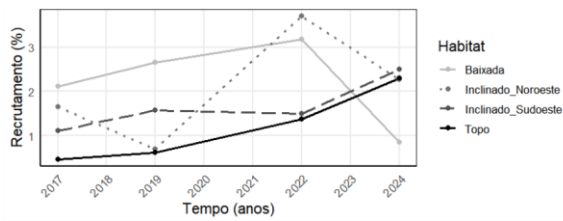
Onde m é a quantidade de indivíduos que morreram durante o intervalo de tempo.

As análises de dados foram realizadas no ambiente R (versão 4.5.1). Para os cálculos de recrutamento e mortalidade, foi construída uma função no R com as fórmulas citadas anteriormente. O pacote “dplyr” foi usado para manipulação dos dados.

Resultados

A Figura 2 apresenta as taxas de recrutamento entre 2017 e 2024. Na janela de 2017–2019, os habitats de baixada, topo e inclinado sudoeste apresentaram aumento gradual do recrutamento, enquanto o inclinado noroeste exibiu uma queda de ~2% para menos de 1%.

Figura 2 - Porcentagem do recrutamento de indivíduos do sub-bosque (DAP maior ou igual a 1 cm e menor ou igual a 10 cm) nos anos de 2017 a 2024 por habitat topográfico. Os pontos presentes nas linhas indicam as janelas temporais, sendo os pontos de 2017 correspondendo à janela de 2013-2017, os pontos de 2019 a janela de 2017-2019, os pontos de 2022 a janela de 2019-2022 e os pontos de 2024 a janela de 2022-2024. A maior taxa de recrutamento apresentada é no habitat Inclinado Noroeste na janela de 2019-2022.



Fonte: Do autor (2025).

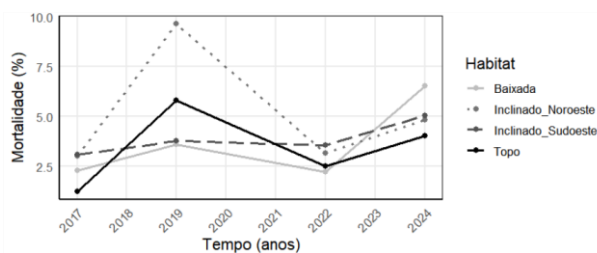
Entre 2019 e 2022, o habitat inclinado noroeste inverteu esse padrão, registrando o maior pico de recrutamento da série (~4%). Nesse mesmo intervalo, baixada e topo continuaram a aumentar do recrutamento, enquanto o Inclinado sudoeste sofreu leve redução. Na janela de 2022–2024, os habitats de baixada e inclinado noroeste apresentaram uma diminuição no recrutamento de ~3% e ~4% respectivamente para ~1% e ~2% ao fim da janela.

A figura 3 mostra que as maiores taxas de mortalidade ocorreram no período de 2017–2019, sobretudo nos habitats de topo (~6%) e inclinado noroeste (~9%). Na janela de 2019–2022, houve um declínio geral da mortalidade em todos os habitats. Destaque ao inclinado noroeste que apresentou uma queda de ~9% para ~2,5% nesse intervalo.

Comentado [U2]: Ajustar esse parágrafo com alinhamento justificado

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

Figura 3- Porcentagem da mortalidade de indivíduos do sub-bosque (DAP maior ou igual a 1 cm e menor ou igual a 10 cm) nos anos de 2017 a 2024 por habitat topográfico. Os pontos presentes nas linhas indicam as janelas temporais, sendo os pontos de 2017 correspondendo à janela de 2013-2017, os pontos de 2019 a janela de 2017-2019, os pontos de 2022 a janela de 2019-2022 e os pontos de 2024 a janela de 2022-2024. As maiores taxas de mortalidade estão apresentadas nos habitats Inclinado Noroeste e Topo na janela de 2017-2019.



Fonte: Do autor (2025).

Entretanto, no intervalo de 2022–2024, a mortalidade voltou a crescer, principalmente na baixada e nos habitats inclinados. O primeiro teve um aumento de aproximadamente 2,5% a 6%, enquanto os habitats inclinados apresentaram um aumento de aproximadamente 3% a 5%.

Discussão

As taxas de recrutamento e mortalidade entre 2017 e 2024 demonstraram a influência de eventos de seca e as características topográficas dos habitats. A primeira janela de 2017-2019, logo após o ENSO, foi registrada baixos valores de recrutamento e alta mortalidade nos habitats de topo e inclinado noroeste. O que evidencia o impacto da seca em áreas com maior exposição à radiação solar, com baixa disponibilidade hídrica e solos menos férteis (Crausbay et al., 2017; Hollunder et al., 2022; Fujimoto et al., 2024).

Na janela de 2019–2022, verificou-se recuperação dos habitats, com redução da mortalidade e aumento do recrutamento. Os habitats de baixada e inclinado sudoeste mantiveram mortalidade estável, em torno de 3%, em um período de maior estabilidade climática que favoreceu a regeneração do sub-bosque após a seca (Hollunder et al., 2021). Ademais, a mortalidade consistentemente superior no inclinado noroeste em relação ao sudoeste reforça o papel da radiação solar e da inclinação na intensificação do estresse hídrico e na dinâmica do sub-bosque (Fan et al., 2020; Hollunder et al., 2022).

Na janela de 2022–2024, observou-se queda no recrutamento na baixada, enquanto os habitats de topo e inclinado sudoeste mantiveram aumento contínuo. Esse declínio na taxa de recrutamento da baixada corrobora estudos que relatam reduções em períodos sem seca ou sob secas moderadas (Toledo et al., 2011; Zuleta et al., 2017; Hollunder et al., 2022). No mesmo intervalo, a mortalidade voltou a crescer, atingindo ~6% na baixada e ~5% nos habitats inclinados, sugerindo que perturbações recentes, ainda não identificadas, limitaram a recuperação.

Durante o ENSO de 2015–2016, a mortalidade do sub-bosque foi de 3%, aumentando para 5% no período pós-seca (2017–2019). Esse padrão está de acordo com estudos anteriores na Mata Atlântica, que registraram valores próximos em eventos de seca passados, como Rolim et al. (2005), com médias de 4,4% nas secas de 1989 e 1999, e Hollunder et al. (2021), com 4% no período de 2014–2017. O recrutamento variou entre 1% e 2%, com pico de 2,25% no pós-seca, resultado semelhante ao reportado por Rolim et al. (2005), que indicaram médias de 2% durante as secas de 1989 e 1999. Esses achados reforçam a consistência dos efeitos da seca sobre a dinâmica do sub-bosque ao longo de diferentes eventos climáticos na Mata Atlântica.

Conclusão

A análise demográfica do sub-bosque no Parque Estadual Mata das Flores revelou um processo de recuperação na regeneração das comunidades vegetais após a seca de 2015–2016, com o aumento

Comentado [U3]: Justificar o texto

A Ciência do NANO e seu impacto transformador no MACRO

gradual do recrutamento e a diminuição da mortalidade dos habitats topográficos. Na janela de 2022–2024, o habitat de baixada apresentou uma inesperada inversão de padrão, com queda expressiva no recrutamento e um acentuado aumento da mortalidade. De aproximadamente 3% para 1% no recrutamento e de 2,5% para cerca de 6% de mortalidade. Essa mudança tardia sugere que a comunidade foi impactada por uma perturbação subsequente ou por efeitos retardados do estresse hídrico. Portanto, a continuidade do monitoramento em longo prazo é fundamental para elucidar os fatores ambientais que levaram a essa recente alteração e para aprofundar a compreensão sobre a resiliência de florestas tropicais em um cenário de mudanças climáticas em curso.

Referências

- CRAUSBAY, S. D. et al.** Defining ecological drought for the twenty-first century. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 98, p. 2543–2550, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0292.1>.
- DE BOECK, H. J. et al.** Patterns and drivers of biodiversity–stability relationships under climate extremes. *Journal of Ecology*, v. 106, p. 890–902, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12897>.
- FAN, B. et al.** Soil micro-climate variation in relation to slope aspect, position, and curvature in a forested catchment. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 290, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107999>.
- FUJIMOTO, Y. et al.** Topographical gradient of the structure and diversity of a woody plant community in a seasonally dry tropical forest in northwestern Madagascar. *Ecological Research*, v. 39, n. 5, p. 705–716, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1440-1703.12475>.
- FYLLAS, N. M. et al.** Solar radiation and functional traits explain the decline of forest primary productivity along a tropical elevation gradient. *Ecology Letters*, v. 20, p. 730–740, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ele.12771>.
- HOLLUNDER, R. K. et al.** Topography and vegetation structure mediate drought impacts on the understory of the South American Atlantic Forest. *Science of The Total Environment*, v. 766, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144234>.
- HOLLUNDER, R. K. et al.** Regional and local determinants of drought resilience in tropical forests. *Ecology and Evolution*, v. 12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ece3.8943>.
- HOLLUNDER, R. K. et al.** Vapor pressure deficit drives the mortality of understorey woody plants during drought recovery in the Atlantic Forest. *Journal of Vegetation Science*, v. 35, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jvs.13222>.
- IPCC.** *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023.
- ITOH, A. et al.** The effect of habitat association and edaphic conditions on tree mortality during El Niño-induced drought in a Bornean dipterocarp forest. *Biotropica*, v. 44, p. 606–617, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00867.x>.
- KOGAN, F.; GUO, W.** Strong 2015–2016 El Niño and implication to global ecosystems from space data. *International Journal of Remote Sensing*, v. 38, n. 1, p. 161–178, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1259679>.

MARIOTTE, P. et al. Subordinate plant species enhance community resistance against drought in semi-natural grasslands. *Journal of Ecology*, v. 101, p. 763-773, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12064>.

ROLIM, S. G. et al. Biomass change in an Atlantic tropical moist forest: the ENSO effect in permanent sample plots over a 22-year period. *Oecologia*, v. 142, p. 238-246, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1717-x>.

SLIK, J. W. F. El Niño droughts and their effects on tree species composition and diversity in tropical rain forests. *Oecologia*, v. 141, p. 114-120, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1635-y>.

TOLEDO, J. J. de et al. How much variation in tree mortality is predicted by soil and topography in Central Amazonia? *Forest Ecology and Management*, v. 262, n. 3, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.03.039>.

ZHANG, R. Q. et al. Water supply following drought: Effects on drought legacy and resilience in a tropical forest – A case study in Xishuangbanna, China. *Ecological Informatics*, v. 79, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102422>.

ZULETA, D. et al. Drought-induced mortality patterns and rapid biomass recovery in a terra firme forest in the Colombian Amazon. *Ecology*, v. 98, p. 2538-2546, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ecy.1950>.

Agradecimentos

O presente estudo foi desenvolvido com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Espírito Santo (FAPES) através da concessão da bolsa de Iniciação Científica ao autor do trabalho, edital 03/2021 com TO 434/2021; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX); ao Laboratório de Botânica (Labot) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo espaço e apoio; à gestão do Parque Estadual de Mata das Flores pelo apoio.