



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE BIOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE BOTÂNICA
CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS - BACHARELADO

MATHEUS VINÍCIUS MACIEL DE LIMA

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE PERTURBAÇÃO E DO TIPO DE
GEOMORFOLOGIA SOBRE A RIQUEZA, ABUNDÂNCIA E ATRIBUTOS
FUNCIONAIS DA CHUVA DE SEMENTES EM UMA ÁREA DE CAATINGA**

Recife

2025

MATHEUS VINÍCIUS MACIEL DE LIMA

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE PERTURBAÇÃO E DO TIPO DE
GEOMORFOLOGIA SOBRE A RIQUEZA, ABUNDÂNCIA E ATRIBUTOS
FUNCIONAIS DA CHUVA DE SEMENTES EM UMA ÁREA DE CAATINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Ciências Biológicas - Bacharelado
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador (a): Profa. Dra. Inara Roberta Leal

Coorientador (a): Me. Mikael Alves de Castro

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Lima, Matheus Vinícius Maciel de.

Influência do gradiente de perturbação e do tipo de geomorfologia sobre a riqueza, abundância e atributos funcionais da chuva de sementes em uma área de Caatinga / Matheus Vinícius Maciel de Lima. - Recife, 2025.

54 p. : il., tab.

Orientador(a): Inara Roberta Leal

Coorientador(a): Mikael Alves de Castro

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Biociências, Ciências Biológicas - Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Diásporos. 2. Atributos funcionais. 3. Antropização. 4. Semiárido. I. Leal, Inara Roberta. (Orientação). II. Castro, Mikael Alves de. (Coorientação). IV. Título.

580 CDD (22.ed.)

MATHEUS VINÍCIUS MACIEL DE LIMA

**INFLUÊNCIA DO GRADIENTE DE PERTURBAÇÃO E DO TIPO DE
GEOMORFOLOGIA SOBRE A RIQUEZA, ABUNDÂNCIA E ATRIBUTOS
FUNCIONAIS DA CHUVA DE SEMENTES EM UMA ÁREA DE CAATINGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Ciências Biológicas - Bacharelado
da Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Ciências Biológicas.

Aprovado em: 26/11/2025

BANCA EXAMINADORA

Me. Mikael Alves de Castro
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Oswaldo Cruz Neto
Universidade Federal de Pernambuco

Dr. Renato Soares Vanderlei
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho às florestas que estou reconstruindo e às que ainda nascerão de minhas mãos, na certeza de que cada árvore plantada é um gesto imperativo de resistência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, às instituições e programas que tornaram este trabalho possível: à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), pelo acolhimento acadêmico e pela formação científica que recebi ao longo destes anos; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro fundamental para a realização das etapas desta pesquisa; ao PPBio RABECA, pelo suporte estrutural; e ao PELD Catimbau, cuja atuação contínua no Parque Nacional do Catimbau possibilitou o desenvolvimento das coletas e o acesso aos dados essenciais para este estudo.

Expresso minha profunda gratidão ao Laboratório de Interação Planta-Animal (LIPA), espaço onde cresci científica e pessoalmente. Agradeço especialmente ao meu coorientador, Mikael Alves de Castro, por sua presença constante, orientação cuidadosa e dedicação ativa em todas as fases da construção deste trabalho. À minha orientadora, Inara Roberta Leal, agradeço pela confiança, rigor acadêmico e pelo exemplo de pesquisadora que inspira demais. Estendo meus agradecimentos a todas as pessoas do LIPA que, de alguma forma, contribuíram com apoio técnico e pessoal, discussões, sugestões e convivência generosa ao longo da jornada.

Agradeço também aos professores que marcaram profundamente minha formação, não apenas como profissional, mas como ser humano. Seus ensinamentos, dedicação e entusiasmo pela ciência foram determinantes para a construção da minha trajetória acadêmica. Em especial, expresso minha admiração ao professor Marccus Vinicius da Silva Alves, cuja paixão pelas aulas de campo e pelo ensino foi um dos contribuintes que consolidou meu encantamento pelo trabalho em ambientes naturais.

Aos amigos que caminharam comigo durante a graduação, deixo meu reconhecimento e carinho. Em especial, agradeço a Iago Monteiro da Costa Wäcker, Leonardo Gabriel Cabral de Melo Souza e Luís Romário da Silva Santos, cuja amizade, parceria e presença constante foram fundamentais para tornar o percurso mais leve, produtivo e alegre.

Por fim, agradeço profundamente à minha família, alicerce de toda a minha trajetória. Aos meus pais, Silvana Maria Maciel de Lima e Josenildo Tavares de Lima, deixo minha gratidão pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo nos momentos difíceis e pelo esforço diário que me permitiu chegar até aqui, inclusive nas madrugadas em que acordavam comigo às três da manhã para que eu pudesse estar na Universidade. A este trabalho, dedico também a eles, que sempre caminharam ao meu lado.

RESUMO

A chuva de sementes representa um dos principais mecanismos de regeneração em florestas sazonais secas e constitui um indicador sensível às perturbações antrópicas crônicas que afetam a Caatinga. Este estudo investigou como diferentes níveis de distúrbio antrópico e dois tipos de geomorfologia, cristalino e sedimentar, influenciam a riqueza, abundância e atributos funcionais das sementes no Parque Nacional do Catimbau, Buíque, Pernambuco. Ao longo de sete meses, foram coletadas 5.154 sementes pertencentes a 29 espécies e 11 famílias, com forte dominância de *Pityrocarpa moniliformis* e elevada participação de sementes autocóricas e barocóricas. Os resultados demonstraram que áreas mais perturbadas apresentaram maior riqueza, abundância e diversidade funcional média, embora esse aumento seja explicado principalmente pelo incremento de poucas espécies oportunistas, sugerindo uma resposta ecológica assimétrica e potencialmente enganosa quanto à resiliência do ecossistema. As diferenças geomorfológicas também exerceram papel determinante: áreas sedimentares exibiram valores superiores para todas as métricas analisadas, indicando maior potencial regenerativo, enquanto áreas cristalinas concentraram sementes maiores e mais pesadas, refletindo estratégias conservativas associadas a ambientes mais limitantes. A análise conjunta dos dados revela que, embora a chuva de sementes numericamente rica possa ocorrer em áreas perturbadas, sua composição funcional tende a se simplificar, comprometendo a capacidade de reposição de espécies sensíveis e a manutenção da diversidade ecológica. Conclui-se que os efeitos das perturbações crônicas são modulados pela heterogeneidade edáfica e que avaliações de regeneração baseadas exclusivamente em riqueza e abundância podem levar a interpretações equivocadas sobre a trajetória sucessional. Assim, o diagnóstico funcional da chuva de sementes emerge como ferramenta essencial para subsidiar ações de conservação e restauração na Caatinga.

Palavras-chave: Diásporos; Atributos funcionais; Antropização; Semiárido.

ABSTRACT

Seed rain is one of the primary mechanisms of regeneration in seasonally dry forests and serves as a sensitive indicator of chronic anthropogenic disturbances affecting the Caatinga. This study investigated how different levels of human disturbance and two geomorphological contexts, crystalline and sedimentary, influence the richness, abundance, and functional traits of seeds in a Caatinga area in Buíque, Pernambuco. Over seven months, 5,154 seeds were collected, belonging to 29 species and 11 families, with strong dominance of *Pityrocarpa moniliformis* and a high representation of autochorous and barochorous seeds. The results showed that more disturbed areas exhibited higher richness, abundance, and mean functional diversity; however, this increase was largely driven by a few opportunistic species, suggesting an asymmetric ecological response that may misleadingly indicate ecosystem resilience. Geomorphological differences also played a decisive role: sedimentary areas displayed higher values for all analyzed metrics, indicating greater regenerative potential, while crystalline areas concentrated larger and heavier seeds, reflecting conservative strategies associated with more limiting environments. The integrated analysis reveals that although numerically rich seed rain may occur in disturbed areas, its functional composition tends to simplify, compromising the replenishment of sensitive species and the maintenance of ecological diversity. We conclude that the effects of chronic disturbances are modulated by edaphic heterogeneity and that regeneration assessments based solely on richness and abundance may lead to misinterpretations of successional trajectories. Thus, the functional diagnosis of seed rain emerges as an essential tool to guide conservation and restoration actions in the Caatinga.

Keywords: Diaspores; Functional traits; Anthropization; Semiarid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Representação de localização geográfica do Parque Nacional do Catimbau. Os triângulos vermelhos constituem as parcelas marcadas em solo sedimentar, enquanto os triângulos azuis são as parcelas marcadas em solo cristalino. **26**
- Figura 2 – Métricas de biometria das sementes (mm). LG: largura; CP: comprimento; ES: espessura. Semente de *Pityrocarpa moniliformis* em representação esquemática. **28**
- Figura 3 – Relação entre o índice de distúrbio antrópico crônico e as três métricas da chuva de sementes: (A) riqueza de espécies, (B) abundância de sementes e (C) diversidade funcional média em solos de embasamento cristalino e de bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE. **31**
- Figura 4 – Comparação entre solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares para três métricas da chuva de sementes no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE: (A) riqueza de espécies, (B) abundância e (C) diversidade funcional média. Os valores representam a distribuição observada em parcelas localizadas sobre cada tipo de substrato, evidenciando diferenças estruturais associadas à geomorfologia. **31**
- Figura 5 – Variação dos atributos funcionais das sementes entre solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE: (A) massa média das sementes e (B) comprimento médio das sementes. **32**

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Estatísticas descritivas da chuva de sementes em solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE, incluindo riqueza média, abundância total, diversidade funcional média e variáveis morfológicas das sementes.	32
Tabela 2 –	Estatísticas descritivas dos coeficientes dos modelos lineares generalizados (GLMs) avaliando os efeitos do índice de distúrbio antrópico crônico (CAD) e da geomorfologia sobre quatro atributos funcionais das sementes no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE. São apresentados os coeficientes, erros-padrão, valores de z e valores de p para cada preditor.	33

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1. Perturbações antrópicas crônicas em ecossistemas de Caatinga	18
3.2. Chuva de sementes como indicador de regeneração e diversidade.....	16
3.3. Atributos funcionais das sementes e estratégias de dispersão	20
3.4. Geomorfologia de cristalinos e sedimentares e a estruturação/funcionamento de comunidades em florestas secas	23
4. METODOLOGIA.....	26
4.1. Área de estudo.....	26
4.2. Delineamento amostral.....	27
4.3. Processamento e identificação das sementes	28
4.3. Análise de dados.....	29
5. RESULTADOS.....	30
6. DISCUSSÃO.....	35
7. CONCLUSÃO	39
8. REFERÊNCIAS	40
9. APÊNDICE — ATRIBUTOS DAS SEMENTES	53

1. INTRODUÇÃO

As perturbações antrópicas constituem um dos principais motores de transformação dos ecossistemas terrestres (Ellis *et al.*, 2010), influenciando padrões de diversidade, estrutura da vegetação e processos ecológicos ao longo do tempo. Entre os diferentes tipos de distúrbio, destacam-se as perturbações antrópicas crônicas, caracterizadas por ações de baixa intensidade, porém recorrentes, que removem biomassa ou alteram continuamente componentes do ambiente (Singh, 1998). Diferentemente dos eventos agudos, como desmatamentos extensos ou queimadas severas, os distúrbios crônicos operam de forma acumulativa, promovendo mudanças graduais, mas persistentes, na capacidade de regeneração, na composição de espécies e na funcionalidade dos ecossistemas (Singh, 1998; Albuquerque *et al.*, 2018). Esse tipo de perturbação tem recebido crescente atenção na ecologia, por representar um mecanismo sutil de degradação que frequentemente passa despercebido em avaliações convencionais, apesar de seus efeitos duradouros sobre a resiliência e a dinâmica de comunidades vegetais (Noutcheu *et al.*, 2024).

A regeneração natural dos ecossistemas florestais é um processo dinâmico, regulado pela interação entre fatores bióticos e abióticos que influenciam a composição, estrutura e funcionamento das comunidades vegetais ao longo do tempo (Khaine *et al.*, 2018; Marchiori *et al.*, 2023; Muñoz, 2017). Entre os mecanismos essenciais para a manutenção e recuperação da vegetação, destaca-se a chuva de sementes, que conecta a fase reprodutiva das plantas adultas ao recrutamento de novos indivíduos (Bezerra *et al.*, 2023; Fróes *et al.*, 2020; Martínez-Orea *et al.*, 2014). Esse processo é decisivo para a diversidade e estrutura das comunidades, refletindo tanto o potencial reprodutivo das espécies quanto a capacidade de regeneração do ambiente (Bezerra *et al.*, 2023; Capellesso *et al.*, 2015). Destarte, compreender os fatores que regulam a chuva de sementes é fundamental para entender os padrões de regeneração em ecossistemas tropicais, especialmente aqueles sujeitos a perturbações crônicas, como as florestas secas (Fróes *et al.*, 2020; Myster *et al.*, 2017; Perini *et al.*, 2019).

Nas últimas décadas, diversos estudos têm investigado como atributos funcionais das sementes, como tamanho, modo de dispersão e estruturas atrativas para a fauna, influenciam as estratégias de regeneração e a resposta das espécies às variações ambientais (Moles *et al.*, 2005; Violle *et al.*, 2007; Westoby *et al.*, 2002). Esses atributos refletem não apenas adaptações evolutivas às condições ecológicas locais, mas também refletem as restrições impostas pelo ambiente e pelas interações ecológicas (Díaz *et al.*, 2013). A dispersão de sementes, por sua vez, é um dos processos ecológicos essenciais para a manutenção da diversidade, pois regula a

conectividade entre populações, reduz a competição intraespecífica e permite a colonização de novos microhabitats (Howe & Miriti, 2004; Janzen, 1970). Contudo, apesar da importância reconhecida da chuva de sementes, persistem lacunas sobre como fatores edáficos, físicos, químicos, biológicos do solo e perturbações antrópicas influenciam sua composição e funcionalidade, especialmente em ecossistemas sazonalmente secos (Vieira & Scariot, 2006).

A disponibilidade e diversidade de propágulos em ambientes florestais são fortemente influenciadas condições ambientais locais, como cobertura vegetal, microclima e tipo de solo (Clark *et al.*, 1999; Cohen, 1966; Norden *et al.*, 2009). No entanto, estudos sobre chuva de sementes em florestas tropicais secas têm a maior ênfase em fatores bióticos, especialmente aqueles mediados por animais, em detrimento de variáveis abióticas, como as propriedades físicas e químicas do solo (Jara-Guerrero *et al.*, 2020; Lebrija-Trejos *et al.*, 2010; Vieira & Scariot, 2006). Esse enfoque limitado é problemático, pois o solo constitui a base para o estabelecimento de plântulas, influenciando diretamente a germinação, o crescimento inicial e a sobrevivência das espécies (Haridasan, 2000; Mayence *et al.*, 2017). Em ambientes semiáridos, onde a disponibilidade hídrica é restrita, variações na textura, estrutura e fertilidade do solo podem determinar o sucesso de recrutamento das sementes e moldar os padrões de diversidade e abundância de espécies ao longo de gradientes ambientais (Mayence *et al.*, 2017; Meiado *et al.*, 2012).

Nesse contexto, as florestas secas de Caatinga constituem um cenário privilegiado para investigar a interação entre fatores edáficos e processos de regeneração (Pifano *et al.*, 2023). Exclusivo do território brasileiro, o domínio da Caatinga ocupa cerca de 10,1% do país e representa o maior e mais contínuo mosaico de vegetação sazonalmente seca da América do Sul (IBGE, 2019; Silva *et al.*, 2017). Trata-se de uma vegetação arbórea ou arbustiva, adaptada à escassez hídrica e a altas temperaturas, caracterizadas por folhas pequenas (microfilia), espinhos e deciduidade foliar (Araújo Filho *et al.*, 2017; Prado, 2003). A forte heterogeneidade ambiental da Caatinga decorre de sua diversidade geológica e pedológica, que inclui desde solos rasos e pedregosos sobre embasamento cristalino até perfis mais profundos sobre bacias sedimentares (Ab'Saber, 1974; Alves; Araújo; Nascimento, 2009; Cardoso & Queiroz, 2007; Schaefer, 2023). Essa variação cria microambientes contrastantes em termos de fertilidade, retenção hídrica e profundidade efetiva do solo, influenciando diretamente o recrutamento e a composição funcional da comunidade vegetal (Campos *et al.*, 2015; Janzen, 1970).

A geomorfologia cristalina, predominante em áreas de relevo acidentado, é geralmente associada a Neossolos Litólicos ou Luvisolos Crômicos, caracterizados por baixa profundidade, alta pedregosidade e pouca capacidade de retenção hídrica (Araújo Filho, 2016;

DiPietro, 2012; Schaefer, 2023). Essas limitações impõem barreiras ao estabelecimento de plântulas e favorecem espécies com estratégias conservativas, sementes pequenas e maior tolerância à dessecação (Guàrdia; Gallart; Ninot, 2000; Mayence *et al.*, 2017; Moles *et al.*, 2005; Taha *et al.*, 2024). Em contraste, áreas sedimentares, geralmente compostas por Neossolos Quartzarênicos (arenossolos) ou Latossolos, são mais profundas e planas, com maior acúmulo de matéria orgânica e desenvolvimento radicular mais eficiente (King *et al.*, 2020; Poirier; Roumet; Munson, 2018; Schaefer, 2023; Sulaiman *et al.*, 2024). Nesses ambientes, o recrutamento de espécies tende a ser mais favorecido, com maior abundância de sementes viáveis e presença de espécies com estratégias aquisitivas, muitas vezes associadas a dispersão zoocórica (Nascimento *et al.*, 2020; Violle *et al.*, 2007; Westoby *et al.*, 2002). Assim, o contraste entre geomorfologias cristalina e sedimentar configura um gradiente funcional importante na Caatinga, influenciando a composição florística, a estrutura e funcionamento da chuva de sementes.

Além de suas condições naturais adversas, a Caatinga sofre intensa pressão antrópica, com destaque para o desmatamento, a extração constante de recursos florestais, a pecuária extensiva e o uso inadequado do solo. Esses fatores promovem degradação ambiental e reduzem a resiliência ecológica do sistema (Alves; Araújo; Nascimento, 2009; Janzen, 1988; Ribeiro *et al.*, 2015; Tavares; Arruda; Silva, 2019). Tais perturbações comprometem os mecanismos de regeneração, reduzindo diversidade e densidade da comunidade vegetal, simplificando a comunidade de plântulas e alterando seus atributos funcionais (Lavôr *et al.*, 2023; Macêdo *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2019; Vanderlei *et al.*, 2022). A chuva de sementes pode ser influenciada pelas perturbações antrópicas na vegetação e intensificadas pela sazonalidade climática. Perturbações antrópicas agudas, como corte e queima da vegetação, prática comum exercida pela população, diminuem significativamente a chuva de sementes, afetando o número e diversidade de sementes (Bezerra *et al.*, 2023). Nesse contexto, compreender como a chuva de sementes responde à interação entre a intensidade das perturbações e a variabilidade edáfica é fundamental para explicar os mecanismos que sustentam a regeneração natural e orientar estratégias mais eficazes de restauração ecológica em ecossistemas semiáridos (Chazdon, 2008; Vieira & Scariot, 2006).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos das perturbações antrópicas crônicas sobre a riqueza, abundância e atributos funcionais da chuva de sementes sobre terrenos cristalinos e sedimentares de uma floresta seca de Caatinga. Espera-se que áreas com maior intensidade de perturbação e terrenos cristalinos apresentem menor riqueza e abundância de sementes, além de uma composição funcional mais simplificada, com

predomínio de espécies anemocóricas, sementes ortodoxas e pequenas. Por outro lado, em terrenos sedimentares menos impactados, prevê-se maior diversidade funcional e predominância de diásporos associados à dispersão zoocórica, refletindo em maior resiliência nas interações ecológicas e potencial de regeneração natural. Dessa forma, esperamos que, em áreas de solo cristalino as diferenças entre áreas com alta e baixa intensidade de perturbação sejam maiores do que em áreas de solo sedimentar em termos de (I) riqueza de espécies, (II) abundância de sementes; e nos seus atributos funcionais que incluem a proporção de (III) sementes pequenas; (IV) autocóricas; (V) tolerância a dessecação; e (VI) sem atributos atrativos para a fauna. A análise desses padrões permitirá compreender como a heterogeneidade edáfica e as perturbações crônicas moldam os processos de regeneração na Caatinga, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre ecologia funcional em ecossistemas secos e para a formulação de estratégias de conservação e manejo sustentável da vegetação nativa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar como a chuva de sementes varia em função das perturbações antrópicas crônicas sobre a riqueza, abundância e atributos funcionais da chuva de sementes em remanescentes de Caatinga, e verificar se esses efeitos diferem entre geomorfologias sedimentares e cristalinas.

2.2. Objetivos específicos

1. Comparar a riqueza de espécies na chuva de sementes entre áreas com alta e baixa intensidade de perturbação nos dois tipos de geomorfologia.
2. Avaliar a abundância de sementes em áreas com diferentes intensidades de perturbação sobre geomorfologias cristalinas e sedimentares.
3. Avaliar como a intensidade da perturbação influencia os atributos funcionais da chuva de sementes, como o tamanho das sementes, modo de dispersão e presença de estruturas atrativas para a fauna.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Chuva de sementes como indicador de regeneração e diversidade

Para entender a dinâmica da regeneração de ecossistemas, existem alguns mecanismos cruciais que devem ser abordados (Vieira & Proctor, 2007; Calegari *et al.*, 2013; Capellesso *et al.*, 2015). Em síntese, são eles: (1) chuva de sementes, caracterizada pela queda de sementes locais e sementes imigrantes (de outros locais) dispersas por vetores bióticos e abióticos no solo (Martínez-Ramos & Soto-Castro 1993) e especialmente relevante para a manutenção da diversidade e para a entrada de novas espécies (Avila *et al.*, 2013; Paula *et al.*, 2023); (2) banco de sementes, que consiste no reservatório de sementes em uma comunidade, localizada na superfície ou abaixo do solo (Capellesso *et al.*, 2015; Roberts & Neilson, 1981) e que está intimamente relacionado ao banco de plântulas, composto por mudas jovens após a germinação das sementes viáveis (Chami *et al.*, 2011); e (3) rebrota, que é a capacidade de um organismo vegetal de gerar novos ramos ou indivíduos a partir de brotos dormentes logo após a ocorrência de um distúrbio que causou remoção da biomassa, como fogo, seca, capina, consumo por herbívoros e, por isso, desempenha papel crucial em ecossistemas secos (Bond & Midgley, 2001; Noutcheu *et al.*, 2024; Pausas & Keeley, 2014).

Diante disso, a avaliação da chuva de sementes na Caatinga assume especial relevância, pois frequentemente constitui a principal fonte de propágulos para o restabelecimento da vegetação (Martínez-Ramos & Soto-Castro, 1993). Ela serve como um mecanismo primário para o recrutamento de espécies, influenciando a biodiversidade e a recuperação natural em áreas degradadas, particularmente durante a estação chuvosa, quando a deposição de sementes atinge o pico (Silva *et al.*, 2018). No entanto, processos de perturbação antrópica, como extração de madeira, pastoreio crônico e agricultura de corte e queima, podem reduzir a abundância e empobrecer taxonomicamente a chuva de sementes, além de favorecer mecanismos alternativos, como a rebrota, o que compromete o restabelecimento da diversidade ao longo do tempo (Noutcheu *et al.*, 2024).

A composição taxonômica da chuva de sementes é determinante para a diversidade e a organização das comunidades em regeneração. Estudos demonstram que remanescentes de Caatinga podem apresentar elevada riqueza na chuva de sementes, como os 40 táxons identificados por Gonçalves *et al.* (2021), indicando que mesmo áreas de fragmento podem manter um conjunto representativo de espécies capazes de colonizar clareiras e ambientes em recuperação. Entretanto, a eficácia do processo regenerativo depende não apenas da riqueza e abundância de diásporos, mas também de sua qualidade biológica, incluindo viabilidade,

capacidade germinativa e tolerância a estressores ambientais. Bezerra *et al.* (2023) mostram que a baixa viabilidade das sementes em condições de estresse hídrico pode limitar a regeneração baseada exclusivamente na chuva de sementes, reforçando a necessidade de considerar múltiplos mecanismos regenerativos na Caatinga.

Diversos fatores ambientais regulam a intensidade, composição e variabilidade espacial da chuva de sementes. A topografia influencia a deposição de diásporos ao criar microgradientes de umidade, luminosidade e deposição de matéria orgânica, afetando a densidade, a riqueza e o tipo de sementes que chegam ao solo (Brachtvogel *et al.*, 2020; Sheldon & Nadkarni, 2013). A precipitação sazonal também desempenha papel central: no semiárido, a dispersão ocorre ao longo de todo o ano, com picos no final da estação seca e início chuvosa tanto para espécies zoocóricas quanto anemocóricas (Dantas *et al.*, 2014), embora a deposição de sementes tenda a se concentrar ao longo da estação chuvosa (Santana & Souto, 2011). Apesar disso, alguns estudos também indicam que a deposição de sementes nem sempre se correlaciona estatisticamente com a precipitação (Lima *et al.*, 2008).

A temperatura média anual também influencia a dinâmica vegetacional e, consequentemente, a produção e dispersão de sementes. Temperaturas mais altas podem intensificar o estresse nas populações de plantas, influenciando a produção de sementes e os padrões de dispersão (Silva *et al.*, 2017). Porém, embora a precipitação e a temperatura sejam cruciais, outros fatores, como a composição do solo, também desempenham papéis na formação da dinâmica da chuva de sementes. Propriedades químicas e físicas do solo, como fertilidade, textura e profundidade, influenciam diretamente o crescimento das plantas e sua capacidade reprodutiva. Ambientes com maior fertilidade tendem a sustentar maior densidade e diversidade arbórea (Medeiros *et al.*, 2008; Mosquera & Moreno-Hurtado, 2022; Silva *et al.*, 2024), enquanto diferenças entre substratos sedimentares e cristalinos moldam a distribuição de espécies herbáceas e arbustivas, embora nem sempre resultem em diferenças expressivas na riqueza total (Silva *et al.*, 2018). Tais diferenças refletem também na dinâmica da chuva de sementes, uma vez que, considerando o fornecimento de melhores condições edáficas, determinadas espécies com alto potencial dispersor e regenerativo podem estar mais presentes, muito pela presença de biota do solo, incluindo bactérias, fungos e invertebrados, que contribuem para o funcionamento e a resiliência do ecossistema (Khaziev, 2011; Wall *et al.*, 2003).

Além dos fatores ambientais que modulam a deposição de diásporos no solo, processos biológicos intrínsecos às plantas também exercem influência decisiva sobre a intensidade e a composição da chuva de sementes. Entre esses processos, destaca-se a polinização, que

determina diretamente a produção de frutos e sementes e, portanto, a quantidade de propágulos disponíveis para dispersão (Ashman *et al.*, 2004). A eficiência dos polinizadores, a compatibilidade reprodutiva das espécies, a fenologia floral e a abundância de recursos florais são variáveis que condicionam a produtividade reprodutiva de plantas tropicais, podendo amplificar ou restringir a chuva de sementes independentemente do ambiente físico (Bawa & Hadley, 1989; Ollerton, 2021). Em ecossistemas secos, onde a limitação hídrica já impõe forte filtro fisiológico, a interação entre plantas e polinizadores adquire ainda mais relevância, pois oscilações nos serviços de polinização, seja por perda de habitat, distúrbios antrópicos ou mudanças climáticas, podem reduzir drasticamente a produção de sementes e comprometer a regeneração natural (López-Vásquez *et al.*, 2024; Potts *et al.*, 2010).

Outro componente determinante para a dinâmica da chuva de sementes é a estrutura da comunidade adulta, cuja riqueza, abundância e composição funcional influenciam diretamente a diversidade e o volume de propágulos que chegam ao solo. Comunidades mais diversas tendem a sustentar uma chuva de sementes mais heterogênea, tanto em termos taxonômicos quanto funcionais, refletindo a distribuição das espécies parentais e seus modos de dispersão (Hubbell *et al.*, 1999; Seidler & Plotkin, 2006). Já a abundância de indivíduos reprodutivos exerce forte controle sobre a intensidade da chuva de sementes, pois populações dominantes podem produzir volumes desproporcionalmente altos de diásporos, contribuindo para padrões de superdispersão espacial ou para a predominância de poucas espécies na regeneração (Howe & Smallwood, 1982; Muller-Landau *et al.*, 2008).

Por fim, quanto ao hábito das espécies dispersas, estudos indicam predominância de espécies arbóreas na composição da chuva de sementes na Caatinga, reforçando a importância ecológica desse grupo funcional para a manutenção da estrutura e do funcionamento dos ecossistemas secos (Fróes *et al.*, 2020). Assim, a chuva de sementes emerge como um indicador-chave tanto da diversidade biológica quanto do potencial regenerativo, integrando respostas a fatores bióticos, abióticos e antrópicos e refletindo a complexidade ecológica típica das florestas sazonais tropicais.

3.2. Perturbações antrópicas crônicas em ecossistemas de Caatinga

Historicamente, as populações humanas têm dependido dos recursos naturais para sobrevivência, desenvolvimento e progresso, com diferentes estratégias de gestão, levando a diferentes resultados de modificações ambientais (Albuquerque, 2007; Ali & Kamraju, 2022). No entanto, com o tempo, o uso adotado pós Revolução Industrial gerou consequências tanto

na formação da cultura humana, uma vez que a exploração infrene se tornou lugar comum nas diversas formas de organização social (Fukuhara, 2017; Rodrigues *et al.*, 2019), quanto na biota global (Balim, 2014; Gouvenain & Clements, 2020; Harfoot, 2018; Kennedy & Rotjan, 2023). A degradação dos processos ecológicos e evolutivos devido à sobreexploração agrava ainda mais estas ameaças, levando a uma perda da diversidade genética essencial para a adaptação (Gouvenain & Clements, 2013). Os solos, por exemplo, que levaram milhares de anos para se desenvolver sob a atividade de microrganismos, fungos e invertebrados, são produtos e componentes de ecossistemas e sustentaram o advento da agricultura há 10.000 anos, apoiando a produtividade agrícola atualmente (Gouvenain & Clements, 2020). Portanto, esse conjunto de mudanças ambientais induzidas pelo ser humano que alteram significativamente os ecossistemas naturais são chamadas de perturbações antrópicas.

Dentro deste contexto, as perturbações antrópicas crônicas (CAD - sigla em inglês para *Chronic Anthropogenic Disturbances*) são mudanças contínuas induzidas pelo ser humano no ambiente, que ocorrem com frequência, mas com baixa intensidade, impactando os ecossistemas ao longo do tempo (Singh, 1998). As principais fontes desses distúrbios incluem a expansão das áreas urbanas e outras formas de antropização de paisagens, aumento do ruído antropogênico, sobrepastoreio e extração contínua de recursos florestais (Gómez *et al.*, 2022; Kok *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2025; Ribeiro *et al.*, 2015; Singh, 1998).

A região semiárida do Nordeste do Brasil, denominada como Caatinga, é uma das regiões semiáridas mais populosas do mundo. Com uma área de cerca de 862.818 km², que equivale a 10,1% do território brasileiro, a Caatinga abriga cerca de 28 milhões de habitantes, e destes 38% estão presentes na zona rural (IBGE, 2019; INSA, 2025), número superior à média de 22,36% apresentada pela região Nordeste segundo o Censo Demográfico de 2022. Esse cenário, aliado à forte dependência dos recursos naturais que a população rural de países em desenvolvimento ainda possui (Singh, 1998) gera condições favoráveis para o aumento das interações entre os seres humanos e o ambiente, especialmente perturbações, potenciais transformadoras dos ecossistemas, assim como alteração dos processos naturais que regem esses ambientes (Ribeiro *et al.*, 2015). E como as populações estão continuamente fazendo uso das áreas naturais, o impacto torna-se de longo prazo: o desmatamento, a alta densidade pecuária, a extração contínua de produtos florestais, pressão de uso do solo a longo prazo são consequências do contato prolongado das populações em intersecção com o meio (Sousa; Mendes; Sousa, 2007; Ribeiro *et al.*, 2015).

Além disso, as distinções entre solos cristalinos e sedimentares estão diretamente relacionadas à resiliência ecológica frente às perturbações antrópicas crônicas (Khan, 2025;

Ribeiro-Neto *et al.*, 2016; Ribeiro *et al.*, 2015). Solos sedimentares mostram maior potencial de regeneração natural, especialmente por apresentarem um ambiente mais favorável para o estabelecimento de espécies herbáceas e arbóreas devido a baixa taxa de deciduidade foliar durante a estação seca e muitas espécies com síndromes de dispersão zoocórica (Costa *et al.*, 2021; Rocha *et al.*, 2004; Sampaio *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2020). Por outro lado, os solos cristalinos apresentam recuperação lenta e frequentemente incompleta após distúrbios, principalmente devido os baixos índices pluviométricos e pelos períodos prolongados de baixa cobertura vegetal e diversidade da região, juntamente com o uso dessas áreas como pastagem para caprinos, dificultando o processo de regeneração e desenvolvimento da vegetação, mesmo após 35 anos de regeneração natural (Andrade *et al.*, 2005; Arraes *et al.*, 2024; Silva *et al.*, 2024).

Os impactos são diversos e podem ser observados em vários aspectos ecológicos da Caatinga: nas comunidades vegetais, as CAD afetam negativamente a diversidade de espécies e a abundância de caules de lenhosas, particularmente entre mudas e árvores jovens, como mostra o estudo de Ribeiro *et al.* (2015), onde os autores sugerem que a economia de subsistência e o extrativismo estão transformando a floresta primária em formações secundárias dominadas por arbustos (Noutcheu *et al.*, 2024; Vanderlei *et al.*, 2021). Conjuntamente, a diversidade funcional da flora lenhosa é comprometida, ao mesmo tempo que converge para um conjunto de características mais "aquisitivas", como madeira mais macia, folhas maiores e mais finas (Ribeiro *et al.*, 2019; Ribeiro *et al.*, 2015). Ainda no mesmo estudo, a proliferação de espécies adaptadas a perturbações, como as da família Euphorbiaceae, também indica uma mudança na estrutura da comunidade em direção a predominância de espécies menos resilientes e maior homogeneização e simplificação da biota local (Ribeiro *et al.*, 2019; Ribeiro-Neto *et al.*, 2016).

3.3. Atributos funcionais das sementes e estratégias de dispersão

A compreensão dos atributos funcionais das plantas é essencial para explicar os mecanismos ecológicos que sustentam a diversidade e o funcionamento dos ecossistemas. Esses atributos são definidos como características mensuráveis de um organismo, englobando propriedades morfológicas, fisiológicas ou de história de vida que influenciam diretamente seu crescimento, sobrevivência e reprodução, repercutindo também sobre o funcionamento do ecossistema em que se inserem (Violle *et al.*, 2007). No caso das sementes, esses atributos assumem papel central, uma vez que determinam a viabilidade, o sucesso no estabelecimento e, em última instância, uma parte significativa da contribuição das espécies para a regeneração

da comunidade vegetal (Patrício & Trovão, 2020; Bezerra *et al.*, 2023; Sheldon & Nadkarni, 2013).

Em ambientes sujeitos a Perturbações Antrópicas Crônicas, o filtro ambiental imposto pelo distúrbio atua como um mecanismo de seleção que favorece sementes com determinadas características morfofuncionais. A abertura do dossel, a compactação do solo, o aumento da temperatura do substrato e a redução de dispersores criam condições que privilegiam sementes pequenas, de rápido estabelecimento e geralmente dispersas pelo vento ou por queda espontânea, que são grupos funcionalmente associados a estratégias pioneiras (Grime, 2001; Westoby *et al.*, 2002). Esses ambientes tendem a apresentar baixa cobertura arbórea e microclima mais seco, o que reduz a viabilidade de sementes grandes, recalcitrantes ou dependentes de sombra, comuns em espécies zoocóricas típicas de florestas maduras (Janzen, 1970; Pritchard *et al.*, 2004; 2022). Além disso, a diminuição da fauna dispersora limita a chegada de sementes maiores, intensificando a seleção para conjuntos dominados por espécies tolerantes a estresses físicos e com alto investimento em número, e não em tamanho, de sementes (Schupp *et al.*, 2010; Galetti & Dirzo, 2013). Assim, a perturbação atua simultaneamente como filtro abiótico e biótico, estruturando a chuva de sementes não apenas pela disponibilidade de propágulos, mas também pela capacidade das espécies de persistirem sob condições ambientais perturbadas.

Na Caatinga, bioma marcado por forte sazonalidade climática, baixa fertilidade dos solos e longos períodos de estiagem, o tamanho e a morfologia das sementes são atributos críticos (Leal *et al.*, 2003; Andrade *et al.*, 2005). Em geral, predominam sementes pequenas se comparado a outros ambientes, entretanto, espécies pioneiras, que necessitam colonizar ambientes abertos e altamente perturbados, frequentemente apresentam sementes maiores, com reservas nutritivas substanciais que garantem maior tolerância ao estresse hídrico e nutricional característico desse bioma (Patrício & Trovão, 2020).

Outro aspecto fundamental está relacionado às síndromes de dispersão, que correspondem aos mecanismos pelos quais as sementes se afastam das plantas-mãe (Pijl, 1982). Esses mecanismos podem ser classificados em bióticos ou abióticos e refletem adaptações evolutivas que permitem a colonização de diferentes habitats, como já apontado por diversos autores (Cote *et al.*, 2022; Armesto & Rozzi, 1989; Griz & Machado, 2001; Green *et al.*, 2022; Greene & Johnson, 1993; Kowarik & Säumel, 2008). A autocoria, por exemplo, ocorre quando a própria planta lança as sementes diretamente no ambiente (Oudtshoorn & Van Rooyen, 1999), enquanto a barocoria baseia-se na ação da gravidade, explorando o peso dos diásporos (Zona, 2017). Outras modalidades incluem a hidrocoria, em que a água atua como vetor de transporte

(Kowarik & Säumel, 2008), a anemocoria, caracterizada pela dispersão pelo vento (Whitford & Duval, 2019), e a zoocoria, na qual os animais desempenham papel de agentes dispersores (Green *et al.*, 2022; Zona, 2017).

A relevância ecológica da dispersão foi evidenciada por Janzen (1970), que ressaltou sua função como processo de diversificação. Segundo o autor, à medida que o diásporo se distancia da planta-mãe, diminui a probabilidade de predação por herbívoros e patógenos específicos daquela espécie, criando uma “janela de oportunidade” para a sobrevivência dos indivíduos jovens. Essa dinâmica contribui para explicar a elevada diversidade arbórea dos ambientes tropicais, a baixa densidade de indivíduos coespecíficos e o espaçamento regular entre adultos da mesma espécie.

Na Caatinga, a importância de cada síndrome de dispersão varia de acordo com fatores como o estágio sucessional, a disponibilidade de dispersores e o grau de perturbação. Gomes e Quirino (2016) observaram predominância de zoocoria, com 44% das espécies dependendo de animais para a dispersão de sementes, destacando a importância dos frutos carnosos como recursos alimentares para a fauna, além de desempenhar uma função significativa na dispersão de sementes. Outros modos, como anemocoria e autocoria, também ocorrem. Já Lavôr *et al.* (2023) identificaram um padrão distinto, com predominância da autocoria (78%), seguida por zoocoria e anemocoria, demonstrando que a composição florística e as condições ambientais locais, como o nível de perturbação e cobertura vegetal, podem influenciar a estratégia dominante.

A zoocoria figurando entre as principais formas de dispersão se deve principalmente a presença de estruturas como arilos, polpas carnosas, carúncula, colorações vivas, sendo estes caracteres considerados atributos funcionais que aumentam a atratividade dos frutos, estimulando o consumo pela fauna (Heleno; Vargas, 2015). Diversas espécies de cactáceas da Caatinga exemplificam essa estratégia, produzindo frutos carnosos consumidos por aves e mamíferos. Santos *et al.* (2019) registraram pelo menos 20 espécies de aves que se alimentam desses frutos, indicando seu papel no transporte de sementes. Entre os dispersores mais relevantes, destacam-se a ave *Tachyphonus rufus* e o lagarto *Tropidurus semitaeniatus*, ambos associados a elevadas taxas de germinação das sementes consumidas (Santos *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2021). Além disso, cerca de 15% das espécies lenhosas da Caatinga possuem nectários extraflorais que atraem formigas, as quais, além de protegerem a planta contra herbívoros, podem atuar no transporte de diásporos, configurando uma interação mutualística de importância ecológica (Leal *et al.*, 2016).

Contudo, a efetividade da zoocoria é modulada pela influência das CAD, que não afetam apenas a composição e a estrutura da vegetação, mas também alteram drasticamente a disponibilidade e o comportamento dos dispersores. Distúrbios contínuos, como presença humana frequente, abertura de trilhas, circulação de animais domésticos e ruídos, funcionam como filtros ambientais capazes de reduzir a riqueza e a atividade de aves e mamíferos dispersores (Galetti & Dirzo, 2013; Bogoni *et al.*, 2020). Assim, mesmo quando indivíduos adultos continuam frutificando o fluxo de sementes não se completa, pois o vetor dispersor pode estar parcial ou totalmente ausente, comprometendo a chegada de propágulos a micro-hábitats adequados (Howe & Smallwood, 1982; Schupp *et al.*, 2010). A perda de dispersores bióticos, particularmente comuns em áreas semiáridas sujeitas a uso humano recorrente, representa um gargalo crítico para a regeneração, pois a manutenção da diversidade vegetal depende do acoplamento entre frutificação e mobilidade da fauna dispersora (Janzen, 1970; Wiegand *et al.*, 2009). Dessa forma, a influência das CAD sobre a dispersão constitui um componente central da limitação à regeneração em ecossistemas secos como a Caatinga.

3.4. Geomorfologia de cristalinos e sedimentares e a estruturação/funcionamento de comunidades em florestas secas

A estrutura e o funcionamento das comunidades vegetais em florestas tropicais sazonais secas são profundamente mediados pelas propriedades do solo e pela natureza do substrato geológico subjacente. Em ambientes onde a água é o principal fator limitante, atributos como profundidade do solo, textura, teor de argila, capacidade de retenção hídrica e concentração de nutrientes determinam não apenas a produtividade primária, mas também a composição florística, os padrões de regeneração e a prevalência de estratégias funcionais associadas à tolerância ao estresse hídrico (Pennington *et al.*, 2009). Assim, diferenças geomorfológicas e edáficas não apenas modulam a disponibilidade hídrica, mas estruturam redes ecológicas inteiras, influenciando a chuva de sementes, o estabelecimento de plântulas, a abundância relativa de formas de vida e a resiliência das comunidades a distúrbios naturais e antrópicos (Dexter *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2025; O'Brien & Escudero, 2022).

Algumas florestas secas, como a Caatinga, abrangem uma ampla diversidade de formações geológicas e tipos de solos, que exercem forte influência sobre sua vegetação e funcionamento ecológico (Leal *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2018). Entre as principais formações, destacam-se os solos derivados de rochas do embasamento cristalino e os associados a bacias sedimentares, que apresentam características físico-químicas contrastantes e condicionam, de

modo distinto, a disponibilidade hídrica, a fertilidade e o estabelecimento da flora (Alves; Araújo; Nascimento, 2009; Cardoso & Queiroz, 2007; Queiroz, 2006; Schaefer, 2023).

A geomorfologia cristalina ocupa cerca de 40% do semiárido e é composta principalmente por rochas metamórficas e ígneas do Pré-Cambriano, como granito e xisto, formadas em condições de alta pressão e temperatura no interior da Terra, resultando em solos mais rasos, pedregosos e com baixa permeabilidade a água (DiPietro, 2012; Schaefer, 2023). No entanto, são mineralmente ricos, ou seja, no geral são dotados de fertilidade de moderada a elevada, além de reterem mais água devido ao alto teor de argila (Silva *et al.*, 2009; Nóbrega & Boas, 2023). Por essas características, são mais utilizados pela população local para atividades como agricultura e extração de madeira, resultando em áreas mais impactadas pela ação antrópica crônica (Queiroz *et al.*, 2017).

Por outro lado, terrenos de geomorfologia sedimentar, também chamados de bacias sedimentares, ocupam os 60% restantes do semiárido, são formados por meio da erosão de rochas como arenito e calcário, que por sua vez são originadas devido processos mais recentes de deposição e erosão de sedimentos (Schaefer, 2023; Pettijohn *et al.*, 1987). Essas características conferem a esses tipos de solo maior profundidade, porém menor retenção de água e de nutrientes na superfície devido a composição arenosa do solo, além de uma topografia plana (Junior, 2022; Moro *et al.*, 2024; Nóbrega & Boas, 2023; Schaefer, 2023). Deste modo, pode-se assumir que essa característica impõe um estresse hídrico diferenciado: enquanto no cristalino a limitação é o volume de solo explorável pelas raízes, no sedimentar a rápida drenagem exige que as plântulas desenvolvam raízes profundas rapidamente para acessar a umidade, o que pode atuar como um filtro seletivo para a composição da chuva de sementes que efetivamente consegue se estabelecer.

Estudos comparativos realizados em ambientes de Caatinga indicam que áreas sobre cristalino tendem a abrigar comunidades vegetais mais abertas e de menor altura, contendo plantas ricas em espinhos e dotadas de deciduidade, processo natural onde a maioria das árvores e arbustos perdem as folhas durante a estação seca para evitar o estresse hídrico (Moro *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2009). De outra forma, os solos sedimentares favorecem formações mais densas e, por vezes, mais ricas, influenciando inclusive a distribuição da fauna (Alves; Araújo; Nascimento, 2009; Lima, 1981; Queiroz, 2006; Silva *et al.*, 2009).

Diferentes tipos de solo afetam as taxas de germinação de espécies nativas. Por exemplo, na Caatinga no município de Ibaretama - CE, *Crataeva tapia* apresentou baixa germinação em Vertissolo, mas prosperou em Neossolo (Gonçalves *et al.*, 2020). Essa variabilidade ressalta a necessidade de estratégias de conservação personalizadas com base nas

características do solo para aumentar a produtividade de sementes (Gonçalves *et al.*, 2020). Pesquisas indicam que elementos químicos específicos do solo se correlacionam com a diversidade de plantas, sugerindo que a compreensão da composição do solo pode orientar os esforços de conservação (Fernández *et al.*, 2022).

Em contraste, embora a qualidade do solo seja crucial para a produtividade nesses ambientes, fatores externos, como mudanças climáticas e atividades humanas, podem agravar a degradação do solo, potencialmente minando esses benefícios (Campos *et al.*, 2015; Alves; Araújo; Nascimento, 2009; Araújo; Belchior; Viegas, 2016; Oliveira *et al.*, 2023). O aumento das temperaturas médias, a irregularidade pluviométrica e o prolongamento dos períodos de estiagem alteram significativamente a dinâmica hídrica dos solos, reduzindo a matéria orgânica, a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de retenção de água (Bell *et al.*, 2010; Horel *et al.*, 2022; Bai *et al.*, 2020; Spanner *et al.*, 2022). Esses processos, combinados à exploração intensiva de recursos lenhosos, ao superpastoreio e ao desmatamento, favorecem a erosão e o empobrecimento físico e químico dos solos (Souza *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2015) com consequências complexas para a estruturação e funcionamento das comunidades.

4. METODOLOGIA

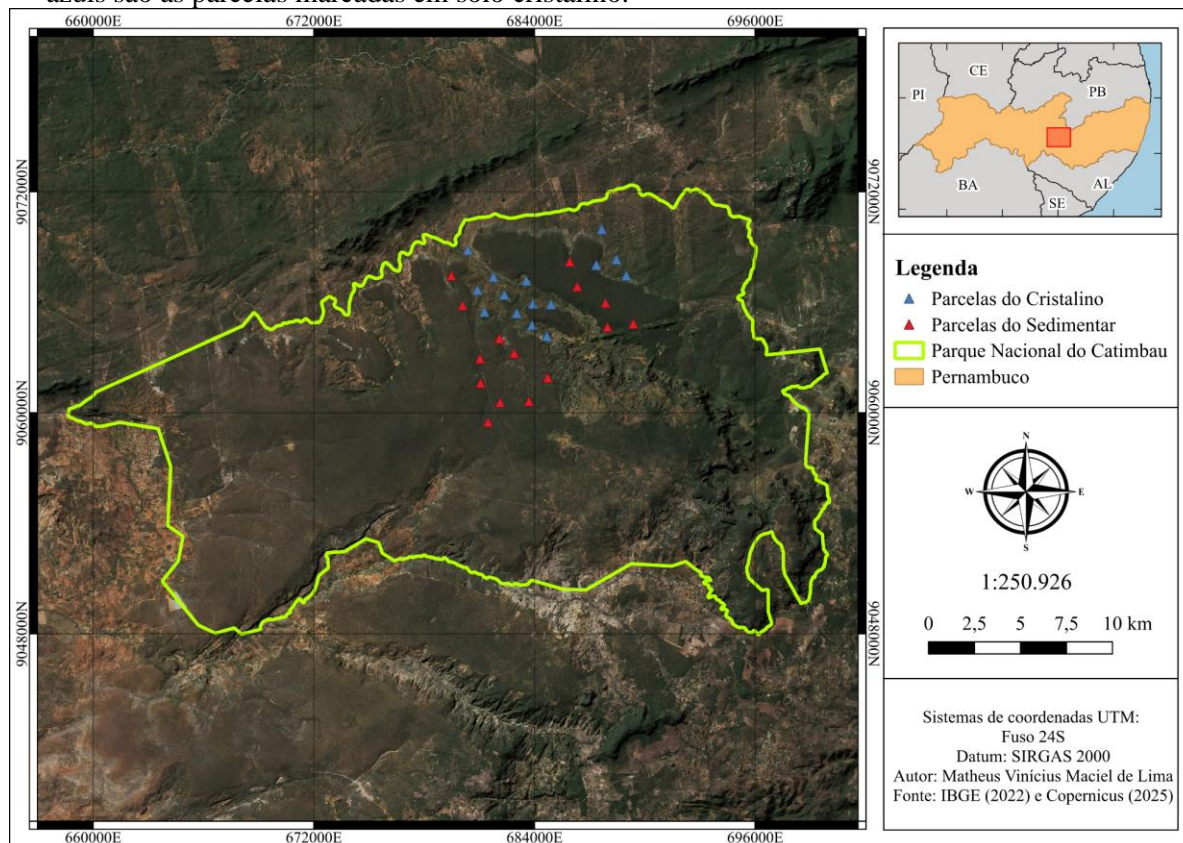
4.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido no Parque Nacional do Catimbau (PARNA Catimbau), localizado no Estado de Pernambuco, Brasil, entre as coordenadas geográficas 8°24'00" e 8°36'35" S e 37°00'30" e 37°10'40" W. O parque possui uma área de aproximadamente 670 km², abrangendo os municípios de Buíque, Tupanatinga e Ibimirim, e integra o conjunto de Unidades de Conservação da Caatinga. O clima da região é classificado como semiárido tropical quente (BSH), segundo a classificação de Köppen-Geiger, com temperatura média anual de 23°C e precipitação variando entre 480 e 1.100 mm/ano, distribuída de forma irregular, concentrando-se principalmente entre os meses de março e junho (Alvares *et al.*, 2013; Souza *et al.*, 2023). O período seco se estende por cerca de seis meses, caracterizando fortes restrições hídricas sazonais.

Do ponto de vista geológico, o PARNA Catimbau apresenta formações cristalinas e sedimentares, com cerca de 70% de sua área composta por arenitos quartzíticos da Bacia do Jatobá e o restante por rochas cristalinas do embasamento pré-cambriano. Essa heterogeneidade edáfica reflete-se na estrutura da vegetação, variando de caatinga arbustivo-arbórea densa em áreas sedimentares, com maior retenção hídrica, a caatinga aberta com cactáceas, bromeliáceas e afloramentos rochosos em ambientes de solo cristalino (Rito *et al.*, 2017; Souza *et al.*, 2023).

O Parque Nacional do Catimbau foi criado em 2002 e é reconhecido como o segundo maior sítio arqueológico do Brasil, abrigando um vasto patrimônio natural e cultural. Apesar de sua criação, o processo de regularização fundiária ainda não foi concluído, resultando na permanência de comunidades tradicionais que mantêm atividades como extração de recursos madeireiros e não madeireiros, criação extensiva de animais e práticas agrícolas de subsistência, incluindo o corte e queima da vegetação. Essas atividades têm causado diferentes níveis de perturbação antrópica, que são foco de avaliação neste estudo (Menezes *et al.*, 2021; Rito *et al.*, 2017).

Figura 1. Representação de localização geográfica do Parque Nacional do Catimbau. Os triângulos vermelhos constituem as parcelas marcadas em solo sedimentar, enquanto os triângulos azuis são as parcelas marcadas em solo cristalino.



Fonte: o autor (2025).

4.2. Delineamento amostral

O estudo foi conduzido em 30 parcelas de 50 m por 20 m (1.000 m²), cada uma foi georreferenciada e separada por uma distância mínima de 1 km entre si, a fim de reduzir a autocorrelação espacial e garantir independência amostral. Além disso, foram propositalmente instaladas em áreas de regime de precipitação semelhante, a fim de minimizar a influência deste fator sobre a amostragem dos dados. O grau de perturbação de cada área foi avaliado utilizando os dados conforme o protocolo proposto por Arnán *et al.* (2018), que considera indicadores como a presença de animais de criação, extração de produtos florestais, proximidade de estradas e propriedades rurais, e evidências de fogo ou corte de vegetação.

Em cada parcela, foram instalados cinco coletores de sementes confeccionados com estruturas de PVC medindo 1 m², suspensos a 1 metro do solo (Procknow *et al.*, 2020) e recobertos por tecido de Nylon de malha fina, de modo a permitir a drenagem da água e reter o material vegetal, evitando a decomposição por acúmulo de umidade. Quatro coletores foram dispostos próximos aos vértices de cada parcela, e o quinto no centro, totalizando 150 coletores

no estudo. Os coletores foram instalados no final de dezembro de 2024 e as coletas mensais iniciaram nos finais de cada mês a partir de janeiro de 2025 até julho do mesmo ano, a fim de concentrar as coletas apenas no período chuvoso, evitando a interferência da sazonalidade de chuvas nos resultados. O conteúdo de cada coletor foi acondicionado em sacos de papel Kraft identificados, para posterior triagem em laboratório.

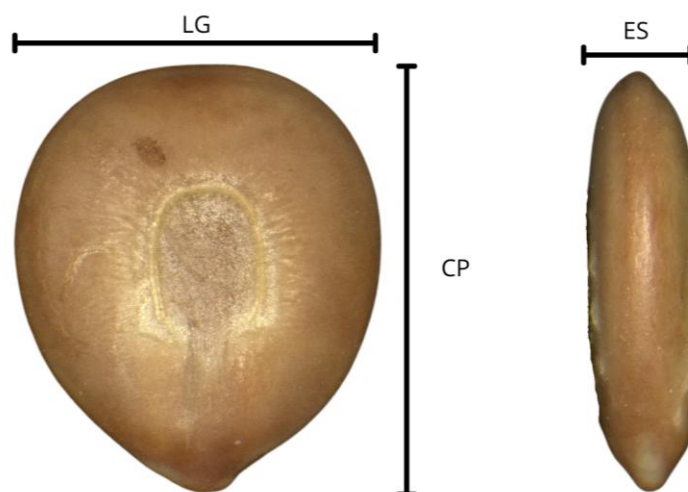
4.3. Processamento e identificação das sementes

No laboratório, os sacos coletados foram abertos para a triagem do material. Inicialmente, foi realizada a separação entre a miscelânea, material não reprodutivo (folhas, flores, galhos e frutos degradados), e as sementes, que foram armazenadas em novos sacos de papel identificados por parcela e por coletor, e contadas. As sementes encontradas em frutos também foram contabilizadas. Em seguida, as sementes foram identificadas ao nível taxonômico mais específico possível, utilizando a consulta a bibliografia (Leite & Machado, 2009; Lorenzi, 1998), especialistas e o conhecimento adquirido em campo. Quando não foi possível identificar ao nível de espécie, as sementes foram classificadas em gênero.

Para cada espécie ou gênero, foram determinados atributos funcionais com base na literatura, incluindo: a síndrome (biótica e abiótica) e vetor de dispersão (anemocoria, autocoria, barocoria, mirmecocoria, epizocoria e endozocoria), nível de tolerância à dessecação (sementes ortodoxas ou recalcitrantes) e presença de estruturas atrativas à fauna (arilos, polpas, carúncula, colorações vivas etc.).

Após a identificação, as sementes foram submetidas à biometria, com a medição do comprimento, largura e espessura (mm), conforme usado por Patrício e Trovão (2020), utilizando um paquímetro digital MTX (150 mm), e da massa úmida (g) em uma balança analítica BEL Engineering mark M214A. A biometria foi realizada apenas para um conjunto padronizado de sementes por táxon e por parcela, de modo a representar adequadamente a variação intraespecífica sem ter pseudorreplicação ao longo dos meses de coleta. Assim, para cada espécie (ou gênero) registrada em uma dada parcela, foi selecionado um subconjunto de até 10 sementes, seguindo o procedimento adotado por Souza *et al.* (2014). Importante destacar que a biometria foi realizada apenas uma vez por espécie em cada parcela, independentemente da recorrência dessa espécie nas coletas mensais. Ou seja, caso uma espécie ocorresse em múltiplos meses na mesma parcela, a mensuração realizada no primeiro mês de ocorrência foi considerada representativa daquela espécie para toda a série temporal naquele local.

Figura 2 — Métricas de biometria das sementes (mm). LG: largura; CP: comprimento; ES: espessura. Semente de *Pityrocarpa moniliformis* em representação esquemática.



Fonte: o autor

4.4. Análise de dados

A análise da chuva de sementes envolveu inicialmente o cálculo das métricas de diversidade e dos atributos funcionais associados às espécies registradas em cada parcela. A diversidade funcional foi estimada utilizando o pacote *hillR*. Para cada parcela, também foram calculados os valores médios ponderados por abundância dos atributos funcionais (CWM – *Community Weighted Means*), incluindo massa, comprimento, largura e espessura das sementes, por meio do pacote *FD*. Após o processamento e a obtenção das métricas, foram utilizados Modelos Lineares Generalizados (GLMs) para investigar os efeitos das perturbações antrópicas crônicas e do tipo de solo sobre a chuva de sementes. As contagens de abundância e riqueza foram modeladas utilizando distribuição Poisson, adequada para dados de natureza discreta. Já a diversidade funcional e os atributos funcionais médios foram analisados sob distribuição Gaussiana. Em todos os modelos, as variáveis explicativas foram o Índice de Distúrbio Antrópico Crônico (CAD) e o tipo de solo (Cristalino ou Sedimentar), avaliados de forma independente. Todas as análises estatísticas foram desenvolvidas no software R, versão 4.5.0 (R Core Team, 2025).

5. RESULTADOS

Ao longo dos 7 meses de experimento foram coletadas 5154 sementes. A distribuição da abundância entre as parcelas apresentou grande variação, com a maior parte deste valor concentrado em janeiro (48%). Valores consistentemente mais altos foram observados em áreas sedimentares, que concentraram aproximadamente 81,30% de todas as sementes registradas. Em contraste, as áreas cristalinas exibiram menor deposição de diásporos, além de uma composição mais dissimilar entre parcelas. Em relação à riqueza, foram identificadas e registradas 29 espécies e 1 gênero, distribuídos em 11 famílias botânicas, evidenciando uma diversidade considerável da chuva de sementes nas áreas amostradas, tendo em vista o período limitado de amostragem. Entre as famílias mais representativas, destacaram-se Euphorbiaceae (36,7%) e Fabaceae (30%), que, juntas, somaram mais de dois terços de todas as espécies registradas. Outras famílias ocorreram com menor frequência, como Apocynaceae (6,7%), enquanto Burseraceae, Sapindaceae, Malpighiaceae, Erythroxylaceae, Rutaceae, Anacardiaceae, Convolvulaceae e Cactaceae ocorreram com menor frequência, muitas representadas por apenas uma espécie.

A composição da chuva de sementes foi marcada por forte dominância de poucas espécies. *Pityrocarpa moniliformis* destacou-se como a espécie mais abundante, sendo responsável por 64,22% de todas as sementes coletadas, sobretudo nas parcelas sedimentares. Outras espécies com contribuição expressiva incluíram *Croton blanchetianus* (6,05%), *Croton echiioides* (6,01%), *Byrsonima vacciniifolia* (4,17%) e *Commiphora leptophloeos* (10,07%), sendo as duas últimas associadas a mecanismos de dispersão zoocórica, evidenciando a eficiência dos vetores animais nesses ecossistemas (14,24%).

De modo geral, áreas com maior intensidade de perturbação antrópica apresentaram não apenas maiores totais de sementes, mas também maior frequência de espécies oportunistas (Tab. 1). A abundância total teve uma forte resposta positiva em relação ao índice de distúrbio antrópico crônico ($\beta = 2,1205$; $p < 0,001$), com valores maiores em solos sedimentares ($\beta = 1,6791$; $p < 0,001$). Esses padrões foram confirmados graficamente (Fig. 3B; Fig. 4B), evidenciando maior abundância de sementes e maior amplitude de variação em áreas sedimentares e sob maior CAD.

A riqueza variou significativamente entre as geomorfologias. As parcelas em solos sedimentares apresentaram maior número de espécies totais (21) e maior constância de ocorrência de espécies exclusivas, contando com 36,7% de espécies únicas contra 30% no cristalino, enquanto 33,3% das espécies apareceram em ambos.

O aumento no nível de pressões antrópicas afetou positivamente a riqueza de espécies na chuva de sementes ($\beta = 1,244$; $p = 0,0201$; Tab. 1), indicando que áreas mais perturbadas apresentaram maior número de espécies. A geomorfologia também se mostrou um fator significativo ($\beta = 0,5274$; $p < 0,001$), com maior riqueza média em solos sedimentares (Fig. 3A; Fig. 4A). Isso reforça a influência de condições edáficas e da intensidade de distúrbio na estruturação da comunidade de plântulas potenciais.

A análise dos atributos funcionais das sementes coletadas (Tab. 3) demonstrou ampla variação nos modos de dispersão e na presença de estruturas associadas à interação com agentes bióticos em relação à abundância. Nas coletas registradas, a zoocoria, especialmente na categoria endozoocoria, foi frequente em quase todas as parcelas, totalizando 15,52% da abundância, principalmente pela presença de *Commiphora leptophloeos*. No entanto, o vetor de dispersão mais frequente na abundância geral foi a barocoria, compondo impressionantes 64,28% da abundância de sementes coletadas, constituído em sua maioria de *Pityrocarpa moniliformis*. Em seguida, a autocoria foi a mais abundante, com 19,95%, formada principalmente por Euphorbiaceae como *Croton blanchetianus* e *Jatropha mollissima*, e Fabaceae como *Senegalia piauhiensis* e *Mimosa ophthalmocentra*, espécies caracterizadas por frutos secos e mecanismos ativos de liberação, como a autocoria balística. A anemocoria foi rara (~0,25%), observada em espécies como *Astronium urundeuva* e *Aspidosperma pyrifolium*.

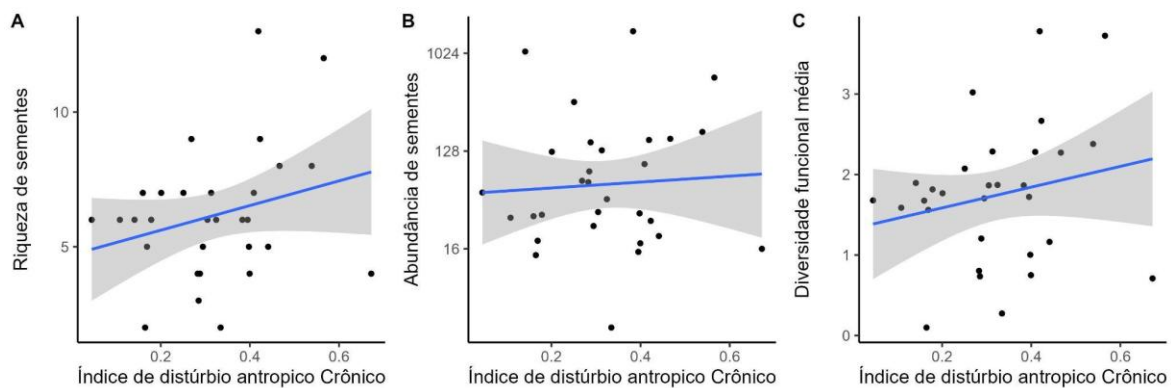
Quanto ao grau de tolerância à dessecação, quase todas as sementes foram classificadas como ortodoxas, sendo *Erythroxylum pungens* a única espécie recalcitrante identificada, correspondendo a apenas 0,23% da abundância geral. A análise da presença de estruturas atrativas para a fauna indicou que 32,32% da abundância total de sementes apresentavam características voltadas à dispersão biótica, mas há grande destaque para espécies autocóricas com dispersão secundária mirmecocórica (diplocoria), como em *Jatropha mutabilis*, *Croton adamantinus* e *Cnidoscolus quercifolius* reforçando a importância considerável de interações planta-animal.

Os resultados do GLM sugerem que as perturbações crônicas aumentam a variedade de estratégias de dispersão presentes na chuva de sementes, uma vez que o CAD exerceu relação positiva sobre a diversidade funcional média ($\beta = 2,4658$; $p = 0,0103$). A geomorfologia também se mostrou significativa ($\beta = 1,1664$; $p < 0,001$), destacando maior diversidade funcional nas áreas sedimentares (Fig. 3C; Fig. 4C).

Os resultados referentes ao índice de distúrbio antrópico revelaram um padrão distinto em relação aos resultados de riqueza e abundância. As perturbações crônicas analisadas não exerceram influência direta sobre o tamanho ou a forma das sementes produzidas (Tab. 1),

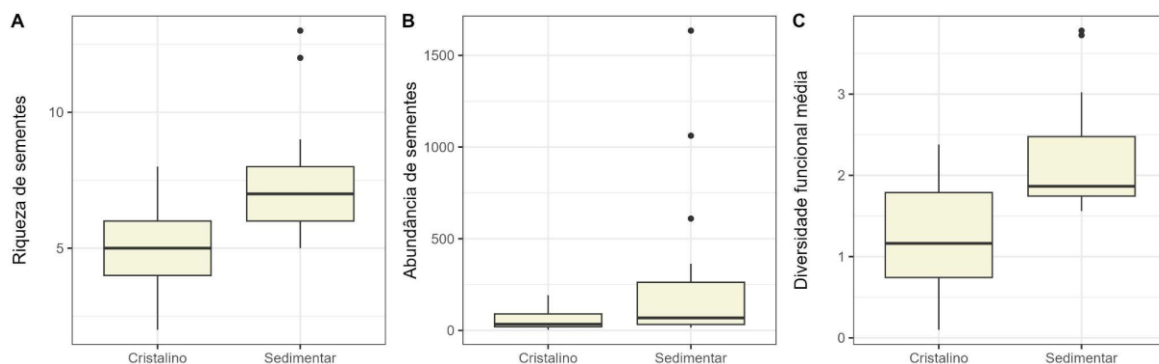
contudo, a geomorfologia influenciou a massa média ($\beta = -0,1415$; $p = 0,0086$) e o comprimento médio das sementes ($\beta = -9,4191$; $p = 0,0018$), com valores maiores em solos cristalinos (Fig. 5A–D).

Figura 3 — Relação entre o índice de distúrbio antrópico crônico e as três métricas da chuva de sementes: (A) riqueza de espécies, (B) abundância de sementes e (C) diversidade funcional média em solos de embasamento cristalino e de bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE.



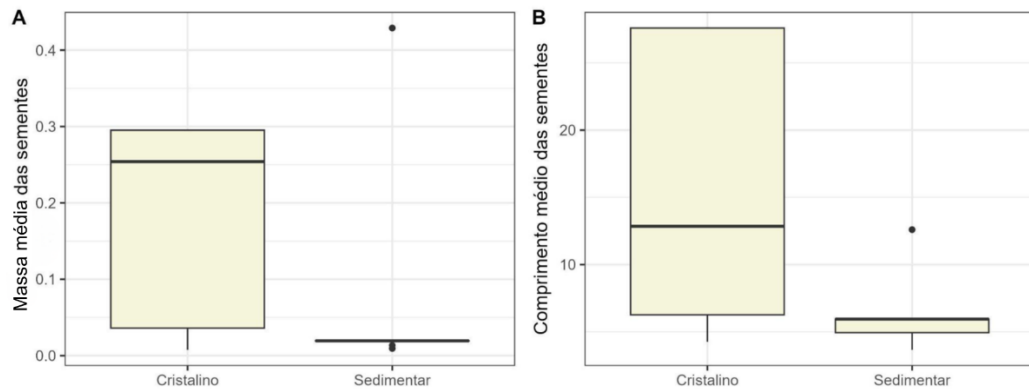
Fonte: o autor (2025)

Figura 4 — Comparação entre solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares para três métricas da chuva de sementes no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE: (A) riqueza de espécies, (B) abundância e (C) diversidade funcional média. Os valores representam a distribuição observada em parcelas localizadas sobre cada tipo de substrato, evidenciando diferenças estruturais associadas à geomorfologia.



Fonte: o autor (2025)

Figura 5 — Variação dos atributos funcionais das sementes entre solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE: (A) massa média das sementes e (B) comprimento médio das sementes.



Fonte: o autor (2025).

Tabela 1 — Estatísticas descritivas da chuva de sementes em solos de embasamento cristalino e bacias sedimentares no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE, incluindo riqueza média, abundância total, diversidade funcional média e variáveis morfológicas das sementes.

Variável y	Variável x	Inclinação	Erro	z	p
Riqueza de sementes	Intercepto	1,1194	0,2365	4,7322	< 0.001
	CAD	1,244	0,5352	2,3246	0.0201
	Geomorfologia	0,5274	0,1565	3,3705	< 0.001
Abundância de sementes	Intercepto	3,3589	0,0512	65,5869	< 0.001
	CAD	2,1205	0,0992	21,3666	< 0.001
	Geomorfologia	1,6791	0,0364	46,0676	< 0.001
Diversidade funcional média	Intercepto	0,3667	0,3643	1,0066	0.3231
	CAD	2,4658	0,8939	2,7583	0.0103
	Geomorfologia	1,1664	0,2507	4,6523	< 0.001

Fonte: o autor (2025).

Tabela 2 — Estatísticas descritivas dos coeficientes dos modelos lineares generalizados (GLMs) avaliando os efeitos do índice de distúrbio antrópico crônico (CAD) e da geomorfologia sobre quatro atributos funcionais das sementes no Parque Nacional do Catimbau, Buíque/PE. São apresentados os coeficientes, erros-padrão, valores de z e valores de p para cada preditor.

Variável y	Variável x	Inclinação	Erro	z	p
Massa média das sementes	Intercepto	0,2977	0,0726	4,1018	< 0.001
	CAD	-0,2985	0,1781	-1,6761	0.1053
	Geomorfologia	-0,1415	0,0499	-2,8335	0.0086
Comprimento médio das sementes	Intercepto	18,1419	3,9439	4,6	< 0.001
	CAD	-8,5553	9,6765	-0,8841	0.3844
	Geomorfologia	-9,4191	2,7139	-3,4707	0.0018
Espessura média das sementes	Intercepto	4,6846	1,1287	4,1504	< 0.001
	CAD	-2,1308	2,7693	-0,7694	0.4483
	Geomorfologia	-1,2846	0,7767	-1,6539	0.1097
Largura média das sementes	Intercepto	7,1498	1,1396	6,274	< 0.001
	CAD	-3,6861	2,796	-1,3183	0.1985
	Geomorfologia	-1,2892	0,7842	-1,644	0.1118

Fonte: o autor (2025).

6. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo revelam padrões marcantes na chuva de sementes da Caatinga, evidenciando que (1) áreas mais perturbadas apresentaram maior riqueza, abundância e diversidade funcional de sementes; (2) solos sedimentares sustentaram densidades significativamente maiores de diásporos e espécies raras mais frequentes, enquanto os solos cristalinos concentraram sementes maiores e mais pesadas; e (3) a composição funcional da chuva de sementes foi dominada por espécies barocóricas e autocóricas, com contribuição significativa de espécies zoocóricas, uma vez que ocorreram em quase todas as parcelas, além da grande representatividade da ortodoxia entre as espécies. Esses padrões, embora parcialmente esperados quanto ao papel da geomorfologia, desafiam a hipótese inicial de que áreas mais degradadas exibiriam menor diversidade e menor aporte de sementes, sugerindo a existência de mecanismos compensatórios ligados à estrutura xerófila e aberta da vegetação, ao comportamento hiperprodutivo e prolongado da frutificação de espécies dominantes, e à generalização das estratégias de dispersão. Portanto, o solo favorável fornece uma base para a ocorrência de uma chuva de sementes mais rica e diversa, enquanto que a perturbação atua como um propulsor da dominância de espécies com dispersão abiótica, resultando em uma chuva de sementes intensa e funcionalmente mais diversa.

Os achados dialogam com dois grandes conjuntos de hipóteses amplamente discutidos quando se trata de ecossistemas secos: (1) a relação entre as perturbações crônicas e simplificação funcional e taxonômica das comunidades (Janzen, 1988; Vieira & Scariot, 2006), e (2) a importância da heterogeneidade edáfica como motor de diversidade e de variação na produtividade de sementes (Haridasan, 2000; Lebrija-Trejos *et al.*, 2010; Maestre & Reynolds, 2007; Xue *et al.*, 2023). Os resultados corroboram parcialmente a segunda hipótese, uma vez que solos sedimentares promoveram maior riqueza, abundância e diversidade funcional, mas contradizem a expectativa clássica de que distúrbios crônicos reduziriam a chuva de sementes. Em vez disso, observamos que maiores valores de CAD se associaram a maior riqueza e maior abundância, diferindo de trabalhos que indicam perda de funcionalidade e menor disponibilidade de propágulos em ambientes degradados (Lopes *et al.*, 2024; Macêdo *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2019; Vanderlei *et al.*, 2022). Assim, a principal contribuição deste trabalho está em demonstrar que a dinâmica da chuva de sementes na Caatinga resulta da atuação da perturbação crônica e da geomorfologia, e não da ação isolada de um único fator. Ao integrar esses dois gradientes, o estudo revela que solos sedimentares apresentam maior capacidade de sustentar elevados fluxos de propágulos mesmo sob maior intensidade de

distúrbio, enquanto áreas sobre solo cristalino respondem de forma distinta e mais restritiva. Isso evidencia que a chuva de sementes em ambientes secos é modulada simultaneamente por filtros ambientais associados ao substrato geológico e pelo histórico de perturbações, reforçando que abordagens que considerem apenas um desses componentes tendem a subestimar a complexidade do processo.

No nível dos processos ecológicos, um mecanismo parece explicar o aumento da abundância e riqueza em áreas mais perturbadas por meio de alterações na comunidade de adultos. Esse mecanismo relata a dominância reprodutiva de espécies oportunistas, especialmente *Pityrocarpa moniliformis*, cuja produção massiva espalhada ao longo do período de amostragem (com pico em janeiro) infla numericamente a chuva de sementes e mascara eventuais efeitos negativos do distúrbio sobre espécies sensíveis. A literatura registra fenômenos semelhantes em ambientes degradados, nos quais poucas espécies altamente produtivas monopolizam o banco e a chuva de sementes, especialmente pela homogeneização ecossistêmica (Howe & Miriti, 2004; Tabarelli & Peres, 2002). A exemplo, segundo Lopes *et al.* (2024), espécies como *Cenostigma pyramidale* e *Croton blanchetianus* apresentam maior abundância em áreas mais perturbadas devido a elevada capacidade de regeneração dessas espécies generalistas, o que garante seu sucesso em ambientes impactados, contribuindo para o estabelecimento de populações dominantes em condições perturbadas.

A forte diferença entre geomorfologias, com sedimentares apresentando valores superiores em riqueza, abundância e diversidade funcional, pode ser atribuída à maior profundidade e aporte de matéria orgânica, que favorecem o desenvolvimento radicular vigoroso e maior rendimento, que por sua vez é capaz favorecer a produção de diásporos (King *et al.*, 2020; Poirier *et al.*, 2018). Solos cristalinos, ao contrário, caracterizam-se por perfis rasos, pedregosidade e baixa retenção hídrica. Essas características podem limitar a energia disponível para reprodução e favorecendo espécies com sementes maiores, estratégia clássica de ambientes estressantes, conforme previsto pela teoria do espectro de tamanho de sementes (Moles *et al.*, 2005). A presença de sementes maiores e mais pesadas no cristalino confirma esse padrão, indicando que, apesar da menor diversidade, as espécies ali presentes têm estratégias conservativas de investimento em propágulos, associadas a maior robustez inicial da plântula.

A predominância de barocoria e autocoria, que juntos representaram mais de 80% da abundância, é coerente com a estrutura da flora da Caatinga e com os padrões globais de ecossistemas secos, onde a dispersão não especializada é favorecida pela baixa densidade de frugívoros, pela arquitetura xeromórfica da vegetação e pela ausência de dossel contínuo (Araújo Filho *et al.*, 2017; Howe & Smallwood, 1982; Janzen, 1970; Prado, 2003). A presença

considerável de zoocoria (15,5%), indica, contudo, que mesmo ambientes mais secos mantêm interações planta-animal relevantes, frequentemente mediadas por vertebrados, como aves e pequenos mamíferos (Fernandes *et al.*, 2023), e formigas, estas últimas desempenhando importante papel secundário (diplocoria), conforme documentado por Leal, Wirth & Tabarelli (2007). Em áreas sedimentares menos limitantes, onde a estrutura vegetacional é desenvolvida, a conectividade entre indivíduos frutíferos também favorece maior fluxo de diásporos bióticos, explicando a maior diversidade funcional observada.

As implicações desses padrões são importantes. Se assumirmos que perturbações crônicas aumentam riqueza e abundância por favorecer espécies oportunistas e com alta produção de diásporos, então áreas degradadas podem apresentar chuva de sementes numericamente elevada, mas dotada de estratégias e aquisitivas em detrimento das conservativas, com baixa diversidade de estratégias reprodutivas que envolvem redes de interação biótica, predominância de formas autocóricas e barocóricas e baixa reposição de espécies de maior valor funcional (Espinosa *et al.*, 2024; Rito *et al.*, 2017). Paralelamente, o contraste entre geomorfologias implica que terrenos sedimentares são mais resilientes, suportando maior diversidade funcional mesmo sob distúrbio (Souza *et al.*, 2022), enquanto áreas cristalinas podem entrar rapidamente em ciclos de degradação ecológica, com perda de espécies sensíveis e predominância de estratégias conservativas, de dispersão limitada e sementes grandes (Ribeiro *et al.*, 2016), portanto, apresentam uma tendência mais clara de generalização e simplificação ecológica. Assim, maiores abundâncias e maior riqueza observadas em áreas perturbadas não indicam necessariamente capacidade de regeneração, mas podem sinalizar uma simplificação funcional mascarada por dominância reprodutiva, um alerta crítico para o manejo da Caatinga.

Por fim, este estudo contribui para o avanço do conhecimento ao demonstrar que os efeitos das perturbações crônicas sobre a chuva de sementes não são unidirecionais, onde a chuva pode variar substancialmente conforme a geomorfologia, a estrutura da comunidade remanescente e as estratégias funcionais das espécies dominantes (Espinosa *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2010). Mostramos que ambientes sedimentares têm maior potencial regenerativo, enquanto ambientes cristalinos são mais vulneráveis a perdas funcionais irreversíveis. Também evidenciamos que a chuva de sementes pode permanecer numericamente rica mesmo em áreas altamente degradadas, reforçando que riqueza e abundância não são bons indicadores isolados de regeneração em florestas secas. Estudos futuros devem integrar análises do banco de sementes, do estabelecimento de plântulas, da estrutura taxonômica e de atributos funcionais do componente adulto para esclarecer como a chuva de sementes se traduz, ou falha

em se traduzir, em recuperação efetiva da vegetação. Ao iluminar as interações entre perturbação, edafologia e estratégias reprodutivas, nossos resultados oferecem bases para manejo diferenciado da Caatinga e para a formulação de estratégias de restauração adaptadas aos tipos de solo e níveis de perturbação.

7. CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a chuva de sementes na Caatinga é influenciada tanto pela intensidade das perturbações antrópicas crônicas quanto pelas diferenças geomorfológicas entre solos cristalinos e sedimentares. Embora originalmente se esperasse que áreas mais perturbadas apresentassem menor aporte de propágulos, os resultados mostram que essas áreas exibiram maiores valores aparentes, embora estes possam refletir uma homogeneização biótica e a proliferação de espécies generalistas, mascarando a perda de funcionalidades essenciais. Isso pode refletir a forte dominância de algumas espécies pioneiras que investem muito em crescimento rápido e na produção de sementes no ambiente. As diferenças entre solos reforçam a importância da heterogeneidade edáfica como determinante do processo de produção e dispersão de sementes. Solos sedimentares apresentando maiores valores evidenciam um possível potencial regenerativo superior, enquanto solos cristalinos com espécies com sementes maiores e estratégias conservativas possivelmente indicam maior vulnerabilidade à degradação, indicando que áreas de solo cristalino exigem estratégias de conservação mais rigorosas (proteção integral), dada a sua menor resiliência natural, enquanto áreas sedimentares podem ter maior aptidão para projetos de restauração passiva/natural. Em síndromes de dispersão, a predominância de barocoria e autocoria confirma a expectativa de que a dispersão abiótica desempenha papel central na dinâmica espacial de comunidades de plantas na Caatinga, enquanto a presença moderada de zoocoria revela que interações planta-animal persistem mesmo em condições adversas.

Em síntese, este trabalho evidencia que os efeitos das perturbações crônicas não são lineares e que sua interpretação depende da análise dos efeitos do tipo de solo, estrutura da vegetação remanescente e estratégias funcionais das espécies. Esse padrão demonstra que riqueza e abundância isoladas não são métricas suficientes para diagnosticar a saúde ecológica em florestas tropicais secas, pois não capturam as mudanças funcionais profundas que ocorrem diante de distúrbios crônicos. Esses resultados reforçam a necessidade de estratégias de conservação que considerem tanto as limitações edáficas quanto os efeitos cumulativos dos distúrbios crônicos, além de apontarem caminhos para ações de restauração baseadas em diagnósticos funcionais mais robustos. Ao revelar como perturbações crônicas e fatores edáficos moldam independentemente o fluxo de diversidade através da paisagem, este estudo contribui para o avanço do conhecimento ecológico na Caatinga e oferece base para políticas públicas, manejo florestal e restauração ecológica em florestas tropicais secas.

8. REFERÊNCIAS

AB'SABER, Aziz Nacib. O domínio morfoclimático semi-árido das caatingas brasileiras. **Geomorfologia**, n. 43, p. 1-39, 1974.

Agência IBGE notícias. Censo 2022: 87% da população brasileira vive em áreas urbanas. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br>> Acesso em: 01 de setembro de 2025.

ALBUQUERQUE, Bruno Pinto de. As relações entre o homem e a natureza e a crise sócio-ambiental. **Rio de Janeiro, RJ. Escola Politécnica de Saúde Joaquim Venâncio, Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz)**, 2007.

ALBUQUERQUE, Ulysses Paulino et al. Humans as niche constructors: Revisiting the concept of chronic anthropogenic disturbances in ecology. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2018.

ALI, Mohd Akhter; KAMRAJU, M. Historical Perspectives on Resource Use. In: **Natural Resources and Society: Understanding the Complex Relationship Between Humans and the Environment**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 9-43.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.

ALVES, Jose Jakson Amancio; DE ARAÚJO, Maria Aparecida; DO NASCIMENTO, Sebastiana Santos. Degradação da Caatinga: uma investigação ecogeográfica. **Revista Caatinga**, v. 22, n. 3, p. 126-135, 2009.

ANDRADE, Leonaldo Alves de. et al. Análise da cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, Estado da Paraíba. **Cerne**, v. 11, n. 3, p. 253-262, 2005.

ARAÚJO FILHO, JC de et al. Solos da Caatinga. **Pedologia: Solos Dos Biomas Brasileiros. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, p. 227-260, 2017.

ARAÚJO FILHO, José Coelho de. Relação solo e paisagem no bioma caatinga. Recife: **Embrapa Solos – UEP Recife**, 2016.

ARAÚJO, Alana Ramos; BELCHIOR, Germana Parente Neiva; VIEGAS, TE de S. Os impactos das mudanças climáticas no Nordeste brasileiro. **Fortaleza: Fundação Sintaf**, p. 1-382, 2016.

ARMESTO, Juan J.; ROZZI, R. Seed dispersal syndromes in the rain forest of Chiloé: evidence for the importance of biotic dispersal in a temperate rain forest. **Journal of biogeography**, p. 219-226, 1989.

ARNAN, X.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; ANDRADE, J. F.; BARROS, M. F.; CÂMARA, T.; ANDERSEN, A. N. A framework for deriving measures of chronic anthropogenic disturbance: surrogate, direct, single and multi-metric indices in Brazilian Caatinga. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 274-282, 2018.

ARRUDA, D. M., DIEGO, O. B., DORES, M. V. and Yule, R. F. N. Seed germination of three species of Fabaceae typical of seasonally dry forest. *Brazilian Journal of Forestry Research*, 35(82): 135-142, 2015.

ASHMAN, Tia-Lynn et al. Pollen limitation of plant reproduction: ecological and evolutionary causes and consequences. **Ecology**, v. 85, n. 9, p. 2408-2421, 2004.

AVILA, Angela Luciana de et al. Mecanismos de regeneração natural em remanescente de Floresta Ombrófila Mista, RS, Brasil. **Cerne**, v. 19, p. 621-628, 2013.

BAI, Xiao et al. Modeling long-term soil water dynamics in response to land-use change in a semi-arid area. **Journal of Hydrology**, v. 585, p. 124824, 2020.

BALIM, Ana Paula Cabral; MOTA, Luiza Rosso; OLIVEIRA DA SILVA, Maria Beatriz. Complexidade Ambiental: O Repensar Da Relação Homem-Natureza e Seus Desafios na Sociedade Contemporanea. **Veredas do Direito**, v. 11, p. 163, 2014.

BAWA, Kamaljit S.; HADLEY, Malcolm (Ed.). **Reproductive ecology of tropical forest plants**. CRC Press, 1991.

BELL, Jesse E.; SHERRY, Rebecca; LUO, Yiqi. Changes in soil water dynamics due to variation in precipitation and temperature: an ecohydrological analysis in a tallgrass prairie. **Water Resources Research**, v. 46, n. 3, 2010.

BEZERRA, Jakelyne S. et al. Negative impact of slash-and-burn agriculture on the seed rain in a tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 531, p. 120821, 2023.

BEZERRA, Jakelyne S. et al. Habemus seeds but they are non-viable: The importance of assessing seed viability in seed rain. **Journal of Arid Environments**, v. 219, p. 105092, 2023.

BOGONI, Juliano A.; PERES, Carlos A.; FERRAZ, Katia MPMB. Extent, intensity and drivers of mammal defaunation: a continental-scale analysis across the Neotropics. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 14750, 2020.

BOND, W. J., & MIDGLEY, J. J. Ecology of sprouting in woody plants: the persistence niche. **Trends in ecology & evolution**, 16(1), 45-51, 2001.

BRACHTVOGEL, Cleide; PEREIRA, Zefa Valdivina; SILVA, Sandro Menezes. Spatial variation of seed rain in deciduous tropical forest. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e879997956-e879997956, 2020.

CALEGARI, Leandro et al. Avaliação do banco de sementes do solo para fins de restauração florestal em Carandaí, MG. **Revista Árvore**, v. 37, p. 871-880, 2013.

CAMPOS, Samuel Alex Coelho et al. Degradação ambiental agropecuária no bioma Caatinga. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 46, n. 3, p. 155-170, 2015.

- CAPELLESSO, Elivane Salete; SANTOLIN, Suéle Fatima; ZANIN, Elisabete Maria. Banco e chuva de sementes em área de transição florestal no sul do Brasil1. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 821-829, 2015.
- CARDOSO, Domingos Benício Oliveira Silva; QUEIROZ, Luciano Paganucci de. Diversidade de Leguminosae nas caatingas de Tucano, Bahia: implicações para a fitogeografia do semi-árido do Nordeste do Brasil. *Rodriguésia*, v. 58, n. 2, p. 379-391, 2007.
- CHAMI, Luciane Belmonte et al. Mecanismos de regeneração natural em diferentes ambientes de remanescente de Floresta Ombrófila Mista, São Francisco de Paula, RS. **Ciência Rural**, v. 41, p. 251-259, 2011.
- CHAZDON, Robin L. Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. **science**, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008.
- CLARK, James S. et al. Seed dispersal near and far: patterns across temperate and tropical forests. **Ecology**, v. 80, n. 5, p. 1475-1494, 1999.
- COHEN, Dan. Optimizing reproduction in a randomly varying environment. **Journal of theoretical biology**, v. 12, n. 1, p. 119-129, 1966.
- CONNELL, Joseph H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs: high diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state. **Science**, v. 199, n. 4335, p. 1302-1310, 1978.
- COTE, Julien et al. Dispersal syndromes in challenging environments: A cross-species experiment. **Ecology Letters**, v. 25, n. 12, p. 2675-2687, 2022.
- CROUZEILLES, Renato et al. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success. **Nature communications**, v. 7, n. 1, p. 11666, 2016.
- DANTAS, Bárbara França et al. As sementes da Caatinga são...”: um levantamento das características das sementes da Caatinga. **Informativo Abrates**, v. 24, n. 3, p. 18-23, 2014.
- DEXTER, Kyle G. et al. Inserting tropical dry forests into the discussion on biome transitions in the tropics. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 6, p. 104, 2018.
- DÍAZ, Sandra et al. Functional traits, the phylogeny of function, and ecosystem service vulnerability. **Ecology and evolution**, v. 3, n. 9, p. 2958-2975, 2013.
- DIPIETRO, Joseph A. Landscape evolution in the United States: an introduction to the geography, geology, and natural history. **Newnes**, 2012.
- ELLIS, Erle C. et al. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. **Global ecology and biogeography**, v. 19, n. 5, p. 589-606, 2010.
- ESPINOSA, C. I. et al. Fewer berries and more pods: losers and winners of chronic disturbance in an Ecuadorian tropical dry forest. [*s. l.*], 2024.

FERNANDES, M. et al. Consumo de Frutos de *Commiphora Leptophloeos* (Burseraceae) por aves Em Uma Área De Caatinga. **Atena Editora**, p. 21–28, 5 Abr. 2023.

FERNÁNDEZ, Zahily Herrero et al. Pernambuco Caatinga: relevance of soil chemical composition for biodiversity conservation. **Chemistry and Ecology**, v. 38, n. 2, p. 108-121, 2022.

FRÓES, Caroline Quinhones et al. Chuva de sementes como indicador ambiental de áreas em processo de restauração ecológica do Mato Grosso do Sul. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 4, p. 1032-1047, 2020.

FUKUHARA, Ryuichi. Human and nature revisited: The Industrial Revolution, modern economics and the Anthropocene. In: **The Kyoto Manifesto for global economics: The platform of community, humanity, and spirituality**. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 35-62.

GALETTI, Mauro; DIRZO, Rodolfo. Ecological and evolutionary consequences of living in a defaunated world. **Biological Conservation**, v. 163, p. 1-6, 2013.

GOMES, Vanessa Gabrielle Nóbrega et al. Endangered globose cactus *Melocactus lanssensianus* PJ Braun depends on lizards for effective seed dispersal in the Brazilian Caatinga. **Plant Ecology**, v. 222, n. 12, p. 1375-1387, 2021.

GOMES, Vanessa Gabrielle Nóbrega; QUIRINO, Zelma Glebya Maciel. Síndromes de dispersão de espécies vegetais no Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 04, p. 1157-1167, 2016.

GOMEZ, Izchel et al. A review of disturbances to the ecosystems of the Mexican Caribbean, their causes and consequences. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 5, p. 644, 2022.

GONÇALVES, F. B. et al. Chuva de sementes em remanescente da Caatinga, Porto da Folha, Sergipe, Brasil. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 1, p. 1279-1290, 2021.

GONÇALVES, Maria da Penha Moreira et al. Influência de diferentes tipos de solos da Caatinga na germinação de espécies nativas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 1216-1226, 2020.

GOUVENAIN, Roland C.; CLEMENTS, Gopalasamy Reuben. Ecological and Evolutionary Processes. In: **Terrestrial Ecosystems and Biodiversity**. CRC Press, 2020. p. 281-287.

GREEN, Andy J.; BALTZINGER, Christophe; LOVAS-KISS, Ádám. Plant dispersal syndromes are unreliable, especially for predicting zoochory and long-distance dispersal. **Oikos**, v. 2022, n. 2, 2022.

GREENE, David F.; JOHNSON, Edward A. Seed mass and dispersal capacity in wind-dispersed diaspores. **Oikos**, p. 69-74, 1993.

GRIME, J. Philip. **Plant strategies, vegetation processes, and ecosystem properties**. John Wiley & Sons, 2006.

GRIZ, Luciana Maria Sobral; MACHADO, Isabel Cristina S. Fruiting phenology and seed dispersal syndromes in caatinga, a tropical dry forest in the northeast of Brazil. **Journal of tropical Ecology**, v. 17, n. 2, p. 303-321, 2001.

GUÀRDIA, R.; GALLART, F.; NINOT, J. M. Soil seed bank and seedling dynamics in badlands of the Upper Llobregat basin (Pyrenees). **Catena**, v. 40, n. 2, p. 189-202, 2000.

HARFOOT, Michael BJ et al. Present and future biodiversity risks from fossil fuel exploitation. **Conservation Letters**, v. 11, n. 4, p. e12448, 2018.

HARIDASAN, Michael. Nutrição mineral de plantas nativas do cerrado. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 12, n. 1, p. 54-64, 2000.

LORENZI, Harri. **Árvores Brasileiras: Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil**. 2. ed. Nova Odessa, SP: Editora Plantarum, 1998. v. 2. ISBN 85-86714-07-0.

HELENO, Ruben.; VARGAS, Pablo. How do islands become green?. **Global Ecology and Biogeography**, 24(5), 518-526. 2015.

HOREL, Ágota et al. Climate change alters soil water dynamics under different land use types. **Sustainability**, v. 14, n. 7, p. 3908, 2022.

HOWE, Henry F.; SMALLWOOD, Judith. Ecology of seed dispersal. **Annual review of ecology and systematics**, v. 13, p. 201-228, 1982.

HOWE, Henry F.; MIRITI, Maria N. When seed dispersal matters. **BioScience**, v. 54, n. 7, p. 651-660, 2004.

HUBBELL, Stephen P. et al. Light-gap disturbances, recruitment limitation, and tree diversity in a neotropical forest. **Science**, v. 283, n. 5401, p. 554-557, 1999.

INSA (Instituto Nacional do Semiárido). O Semiárido Brasileiro. Disponível em: <<https://www.gov.br/insa/pt-br>> Acesso em: 31 de agosto de 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000*. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 168 p. (Série Relatórios Metodológicos, v. 45). ISBN 978-85-240-4510-3.

JANZEN, Daniel H. Herbivores and the number of tree species in tropical forests. **The American Naturalist**, v. 104, n. 940, p. 501-528, 1970.

JANZEN, Daniel H. Tropical Dry Forests. **BIODIVERSITY**. Washington, D.C.: National Academies Press, 1988. 130-137 p. ISBN 0-309-56736-X.

JARA-GUERRERO, Andrea et al. Dispersal syndrome influences the match between seed rain and soil seed bank of woody species in a Neotropical dry forest. **Journal of Vegetation Science**, v. 31, n. 6, p. 995-1005, 2020.

JUNIOR, Arnaldo Joaquim de Souza et al. Spodosol formation on sandy ruins in a semi-arid climate in the Catimbau National Park, Northeast Brazil. **Catena**, v. 229, p. 107226, 2023.

JUNIOR, Carlos R. P. et al. Lithic soils in the semi-arid region of Brazil: edaphic characterization and susceptibility to erosion. **Journal of Arid Land**, v. 14, n. 1, p. 56-69, 2022.

KENNEDY, Brian RC; ROTJAN, Randi D. Mind the gap: comparing exploration effort with global biodiversity patterns and climate projections to determine ocean areas with greatest exploration needs. **Frontiers in Marine Science**, v. 10, p. 1219799, 2023.

KHAINE, Inkyin et al. Factors affecting natural regeneration of tropical forests across a precipitation gradient in Myanmar. **Forests**, v. 9, n. 3, p. 143, 2018.

KHAN, Jehanzeb. Geological Impact On Plant Community Structure And Diversity. **Annual Methodological Archive Research Review**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 1–12, 2025.

KHAZIEV, F. Kh. Soil and biodiversity. **Russian Journal of Ecology**, v. 42, n. 3, p. 199-204, 2011.

KOK, Annebelle et al. How chronic anthropogenic noise can affect wildlife communities. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, p. 1130075, 2023.

KOWARIK, Ingo; SÄUMEL, Ina. Water dispersal as an additional pathway to invasions by the primarily wind-dispersed tree *Ailanthus altissima*. **Plant Ecology**, v. 198, n. 2, p. 241-252, 2008.

LAVÔR, Iara Alves de et al. Análise da diversidade e caracterização das síndromes de dispersão de diásporos em um gradiente sucessional de caatinga hiperxerófila. **Biodiversidade Brasileira**, v. 13, n. 3, 2023.

LEAL, Inara R. et al. Plant–animal interactions in the Caatinga: overview and perspectives. **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**, p. 255-278, 2017.

LEAL, Inara R.; WIRTH, Rainer; TABARELLI, Marcelo. Seed dispersal by ants in the semi-arid Caatinga of north-east Brazil. **Annals of botany**, v. 99, n. 5, p. 885-894, 2007.

LEAL, Inara Roberta; TABARELLI, Marcelo; DA SILVA, José Maria Cardoso (Ed.). **Ecologia e conservação da Caatinga**. Editora Universitária UFPE, 2003.

LEBRIJA-TREJOS, Edwin et al. Pathways, mechanisms and predictability of vegetation change during tropical dry forest succession. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 12, n. 4, p. 267-275, 2010.

LEHMANN, Johannes; KLEBER, Markus. The contentious nature of soil organic matter. **Nature**, v. 528, n. 7580, p. 60-68, 2015.

LEITE, Ana Virgínia; MACHADO, Isabel Cristina. Biologia reprodutiva da "catingueira" (*Caesalpinia pyramidalis* Tul., Leguminosae-Caesalpinioideae), uma espécie endêmica da Caatinga. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, p. 79-88, 2009.

LIMA, Aurenívia Bonifácio de; RODAL, Maria Jesus Nogueira; SILVA, Ana Carolina Borges Lins e. Chuva de sementes em uma área de vegetação de Caatinga no estado de Pernambuco. **Rodriguésia**, v. 59, n. 4, p. 649-658, 2008.

LI, Jianfeng et al. Seasonal variations in ecological environment quality across different geomorphological regions and their response mechanisms to climate change. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 26385, 2025.

LIMA, D. Andrade. The caatinga dominium. **Revista brasileira de Botânica**, v. 4, p. 149-163, 1981.

LIMA, Ricardo Cordeiro et al. Influência das perturbações antrópicas em unidades de conservação urbanas de Mata Atlântica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 26, n. 103, p. 220–240, 2025.

LOPES, Sérgio de Faria et al. Influence Of Anthropic Disturbance In Structure Of Plant Populations Along An Elevation Gradient In Caatinga Region. **Revista Árvore**, v. 48, p. e4803, 2024.

LÓPEZ-VÁZQUEZ, Karla et al. The human touch: a meta-analysis of anthropogenic effects on plant-pollinator interaction networks. **PeerJ**, v. 12, p. e17647, 2024.

MACÊDO, Maria Soraya et al. Everything's not lost: Caatinga areas under chronic disturbances still have well-preserved plant communities. **Journal of Arid Environments**, v. 222, p. 105164, 2024.

MAESTRE, Fernando T.; REYNOLDS, James F. Biomass responses to elevated CO₂, soil heterogeneity and diversity: an experimental assessment with grassland assemblages. **Oecologia**, v. 151, n. 3, p. 512-520, 2007.

MARCHIORI, Johnatan Jair de Paula et al. What Do Seedlings Like? The Relationship between Seedling Richness and Abundance with Abiotic Factors. **Agricultural Sciences**, v. 14, n. 6, p. 767-774, 2023.

MARTÍNEZ-OREA, Yuriana. Seed rain as a source of propagules for natural regeneration in a temperate forest in Mexico City1. **The Journal of the Torrey Botanical Society**, v. 141, n. 2, p. 135-150, 2014.

MARTÍNEZ-RAMOS, M.; SOTO-CASTRO, A. Seed rain and advanced regeneration in a tropical rain forest. **Vegetatio**, v. 107, n. 1, p. 299-318, 1993.

MAYENCE, C. E. et al. Edaphic constraints on seed germination and emergence of three Acacia species for dryland restoration in Saudi Arabia. **Plant ecology**, v. 218, n. 1, p. 55-66, 2017.

MEDEIROS, Maria Lúcia Dantas; DOS SANTOS, Rivaldo Vital; TERTULIANO, Sylvia Sátyro Xavier. Avaliação do estado nutricional de dez espécies arbóreas ocorrentes no semi-árido paraibano. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 3, p. 31-39, 2008.v

MEIADO, Marcos Vinicius et al. Diaspore of the caatinga: a review. Flora of the Caatingas of the São Francisco River: Natural History and Conservation. **Rio de Janeiro: Andrea Jakobsson Estúdio Editorial**, p. 306-365, 2012.

MENEZES, Tatiane et al. Introduced goats reduce diversity and biomass of herbs in Caatinga dry forest. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 1, p. 79-90, 2021.

MOLES, Angela T. et al. A brief history of seed size. **Science**, v. 307, n. 5709, p. 576-580, 2005.

MORO, Marcelo Freire et al. Vegetação, unidades fitoecológicas e diversidade paisagística do estado do Ceará. **Rodriguésia**, v. 66, n. 3, p. 717-743, 2015.

MORO, Marcelo Freire et al. Biogeographical districts of the Caatinga dominion: a proposal based on geomorphology and endemism. **The Botanical Review**, v. 90, n. 4, p. 376-429, 2024.

MULLER-LANDAU, Helene C. et al. Interspecific variation in primary seed dispersal in a tropical forest. **Journal of Ecology**, p. 653-667, 2008.

MUÑOZ, Johana. Regeneración Natural: Una revisión de los aspectos ecológicos en el bosque tropical de montaña del sur del Ecuador. **Bosques Latitud Cero**, v. 7, n. 2, p. 130-143, 2017.

MYSTER, Randall. Does the seed rain limit recruitment, regeneration, and plant community dynamics?. **Ideas in Ecology and Evolution**, v. 10, n. 1, 2017.

NEVES, Edinaldo Luz das; VIANA, Blandina Felipe. Dispersão e predação de sementes de três espécies de *Jatropha* L.(Euphorbiaceae) da caatinga, semi-árido do Brasil. **Candombá**, v. 4, n. 1, p. 146-157, 2008.

NÓBREGA, Marcelo Araújo; BOAS, Ariel Moura Vilas. Características físico-químicas dos solos da região do alto curso das bacias hidrográficas do Rio Pardo e Paraguaçu e suas relações com as fitofisionomias–Bahia, Brasil. **Seven Editora**, v. 3, 2023.

NORDEN, Natalia et al. Resilience of tropical rain forests: tree community reassembly in secondary forests. **Ecology letters**, v. 12, n. 5, p. 385-394, 2009.

NOUTCHEU, Ronald et al. Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 22, n. 1, p. 79-92, 2024.

NOVAES, L. R. et al. Unravelling the drivers of seed dispersal distance in Brazilian savanna anemochoric species: The role of abiotic and biotic factors. **Plant Biology**, 2025.

O'BRIEN, Michael J.; ESCUDERO, Adrián. Topography in tropical forests enhances growth and survival differences within and among species via water availability and biotic interactions. **Functional Ecology**, v. 36, n. 3, p. 686-698, 2022.

OLLERTON, Jeff. **Pollinators and pollination: nature and society**. Pelagic Publishing Ltd, 2021.

OLIVEIRA, L. C. et al. Mudanças Climáticas e potenciais Impactos Negativos No Bioma Caatinga, Semiárido Brasileiro. **Editora Científica Digital**, 2023. p. 263-275.

OUUDTSOORN, Karen van Rheede van; VAN ROOYEN, Margaretha W. Autochory. In: **Dispersal Biology of Desert Plants**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1999. p. 81-91.

PATRÍCIO, Marcelo da Costa; TROVÃO, Dilma Maria de Brito Melo. Seed biometry: another functional trait in caatinga. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 42, p. 1-11, 2020.

PAULA, Alexandre Souza de et al. The role of seed rain and soil seed bank in the regeneration of a Caatinga dry forest following slash-and-burn agriculture. **Journal of Arid Environments**, v. 211, p. 104948, 2023.

PAUSAS, Juli G.; KEELEY, Jon E. Evolutionary ecology of resprouting and seeding in fire-prone ecosystems. **New Phytologist**, v. 204, n. 1, p. 55-65, 2014.

PENNINGTON, R. Toby; LAVIN, Matt; OLIVEIRA-FILHO, Ary. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 437-457, 2009.

PERINI, Monique; DIAS, Henrique Machado; KUNZ, Sustanis Horn. The role of environmental heterogeneity in the seed rain pattern. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. spe 1, p. e20180406, 2019.

PETTIJOHN, F. J.; POTTER, Paul Edwin; SIEVER, Raymond. Sandy depositional systems. In: **Sand and Sandstone**. New York, NY: Springer New York, 1987. p. 341-423.

PIFANO, Daniel Salgado et al. Estrutura e diversidade das comunidades arbóreas de áreas em regeneração da caatinga com diferentes históricos de uso. **Oecologia Australis, Rio de Janeiro**, v. 27, p. 358-374, 2023.

PIJL, Leendert et al. **Principles of dispersal in higher plants**. Berlin: Springer-Verlag, 1982.

POIRIER, Vincent; ROUMET, Catherine; MUNSON, Alison D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 246-259, 2018.

POTTS, Simon G. et al. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. **Trends in ecology & evolution**, v. 25, n. 6, p. 345-353, 2010.

PRADO, Darién E. As caatingas da América do Sul. **Ecologia e conservação da Caatinga**, v. 2, n. 1, p. 3-74, 2003.

PRITCHARD, Hugh W. et al. Ecological correlates of seed desiccation tolerance in tropical African dryland trees. **American Journal of Botany**, v. 91, n. 6, p. 863-870, 2004.

PRITCHARD, Hugh W. et al. Regeneration in recalcitrant-seeded species and risks from climate change. In: **Plant regeneration from seeds**. Academic Press, 2022. p. 259-273.

PROCKNOW, Djoney et al. Seed rain as an ecological indicator of forest restoration in the Pampa biome. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p. 1-8, 2020.

QUEIROZ, Luciano Paganucci de et al. Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga domain. In: **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 23-63.

QUEIROZ, Luciano Paganucci. The Brazilian Caatinga: phytogeographical patterns inferred from distribution data of the Leguminosae. In: **Neotropical savannas and seasonally dry forests**. CRC Press, 2006. p. 121-157.

QUINTO-MOSQUERA, Harley; MORENO-HURTADO, Flavio H. Influencia de los nutrientes del suelo sobre el crecimiento arbóreo en bosques del Pacífico colombiano. **Colombia forestal**, v. 25, n. 2, p. 30-44, 2022.

R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. 2025.

RIBEIRO, Elâine MS et al. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 52, n. 3, p. 611-620, 2015.

RIBEIRO, Elâine MS et al. Functional diversity and composition of Caatinga woody flora are negatively impacted by chronic anthropogenic disturbance. **Journal of Ecology**, v. 107, n. 5, p. 2291-2302, 2019.

RIBEIRO-NETO, José Domingos et al. Chronic anthropogenic disturbance causes homogenization of plant and ant communities in the Brazilian Caatinga. **Biodiversity and conservation**, v. 25, n. 5, p. 943-956, 2016.

RITO, K. F.; ... TABARELLI, M. Precipitation mediates the effect of human disturbance on the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Ecology**, v. 105, n. 3, p. 828-838, 2017.

RITO, Kátia F.; TABARELLI, Marcelo; LEAL, Inara R. Euphorbiaceae responses to chronic anthropogenic disturbances in Caatinga vegetation: from species proliferation to biotic homogenization. **Plant Ecology**, v. 218, n. 6, p. 749-759, 2017.

ROBERTS, H. A.; NEILSON, June E. Changes in the soil seed bank of four long-term crop/herbicide experiments. **Journal of Applied Ecology**, p. 661-668, 1981.

ROCHA, Pedro Luís B. da; QUEIROZ, Luciano P. de; PIRANI, José Rubens. Plant species and habitat structure in a sand dune field in the Brazilian Caatinga: a homogeneous habitat harbouring an endemic biota. **Brazilian Journal of Botany**, v. 27, p. 739-755, 2004.

RODRIGUES, Suzi Carolina Moraes et al. Os recursos naturais no processo de desenvolvimento econômico capitalista: uma breve reflexão. **Semioses**, 2019.

SAMPAIO, E.V.S.B.; GIULIETTI, A.M.; VIRGÍNIO, J. & GAMARRA-ROJAS, C.F.L. (eds.). Vegetação e flora da caatinga. **APNE/CNIP**, Recife. 176p, 2002

SANTANA, José Augusto da Silva; SOUTO, Jacob Silva. Produção de serapilheira na Caatinga da região semi-árida do Rio Grande do Norte, Brasil. **Idesia (Arica)**, v. 29, n. 2, p. 87-94, 2011.

SANTOS, Danielle Melo dos et al. Variação espaço-temporal do banco de sementes em uma área de floresta tropical seca (caatinga)–Pernambuco. 2010.

SANTOS, Lilia D.'ark N. et al. Frugivoria por aves em quatro espécies de Cactaceae na Caatinga, uma floresta seca no Brasil. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 109, p. e2019034, 2019.

SCHAEFER, Carlos EGR (Ed.). The Soils of Brazil. **Springer Nature**, 2023.

SCHUPP, Eugene W.; JORDANO, Pedro; GÓMEZ, José María. Seed dispersal effectiveness revisited: a conceptual review. **New phytologist**, v. 188, n. 2, p. 333-353, 2010.

SEIDLER, Tristram G.; PLOTKIN, Joshua B. Seed dispersal and spatial pattern in tropical trees. **PLOS biology**, v. 4, n. 11, p. e344, 2006.

SHELDON, Kimberly S.; NADKARNI, Nalini M. Spatial and temporal variation of seed rain in the canopy and on the ground of a tropical cloud forest. **Biotropica**, v. 45, n. 5, p. 549-556, 2013.

SILVA, Jessica Luiza S. et al. Divergent responses of plant reproductive strategies to chronic anthropogenic disturbance and aridity in the Caatinga dry forest. **Science of the total environment**, v. 704, p. 135240, 2020.

SILVA, José Maria Cardoso da et al. The Caatinga: understanding the challenges. In: **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 3-19.

SILVA, José Maria Cardoso da; LEAL, Inara R.; TABARELLI, Marcelo (Ed.). **Caatinga: the largest tropical dry forest region in South America**. Springer, 2018.

SILVA, Joselane Priscila Gomes da et al. Chuva de sementes e estabelecimento de plântulas em floresta tropical na região nordeste do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1478-1490, 2018.

SILVA, Kionara Sarabella Turíbio e et al. Influência de determinantes ambientais na vegetação da Caatinga. **Sociedade e território**, v. 29, n. 1, p. 183-198, 2017.

SILVA, Kleber Andrade da; ARAÚJO, Elcida de Lima; FERRAZ, Elba Maria Nogueira. Estudo florístico do componente herbáceo e relação com solos em áreas de caatinga do embasamento cristalino e bacia sedimentar, Petrolândia, PE, Brasil. **Acta botanica brasílica**, v. 23, p. 100-110, 2009.

SILVA, Luiz Filipe dos Santos et al. Changes in Soil C, N, and P Concentrations and Stocks after Caatinga Natural Regeneration of Degraded Pasture Areas in the Brazilian Semiarid Region. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 8737, 2024.

SILVA, Mateus Cardoso Silva et al. Heterogeneidade de substratos e diversidade de herbáceas na Caatinga sedimentar e cristalina. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 3, 2018.

SINGH, Surendra P. Chronic disturbance, a principal cause of environmental degradation in developing countries. **Environmental conservation**, v. 25, n. 1, p. 1-2, 1998.

SOUSA, Juliana Rodrigues; MENDES, Poliana Gabriella Araujo; SOUSA, Marta Maria Almeida. Regeneração da vegetação de caatinga após cultivo de subsistência em Assaré-CE. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S1, p. 192-194, 2007.

SOUZA, Bartolomeu Israel de; ARTIGAS, Rafael Cámara; LIMA, Eduardo Rodrigues Viana de. Caatinga e desertificação. **Mercator (Fortaleza)**, v. 14, n. 1, p. 131-150, 2015.

SOUZA, J. T.; ARAÚJO, E. L. Does proximity to a mature forest contribute to the seed rain and recovery of an abandoned agriculture area in a semiarid climate? **Plant Biology**, v. 16, n. 4, p. 748-756, 2014.

SOUZA, José João Lelis Leal et al. Organic carbon rich-soils in the brazilian semiarid region and paleoenvironmental implications. **Catena**, v. 212, p. 106101, 2022.

SPANNER, Gustavo C. et al. Dry season transpiration and soil water dynamics in the Central Amazon. **Frontiers in plant science**, v. 13, p. 825097, 2022.

SULAIMAN, Nazhatul Syahirah et al. Review on The Impacts of Biochar and Soil Organic Matter (SOM) Habitation toward the Soil Physico-Chemical Properties Conjugating with Maize (*Zea mays*) Growth Performance. **Journal of Tropical Resources and Sustainable Science (JTRSS)**, v. 12, n. 1, p. 28-35, 2024.

TABARELLI, Marcelo; PERES, Carlos A. Abiotic and vertebrate seed dispersal in the Brazilian Atlantic forest: implications for forest regeneration. **Biological Conservation**, v. 106, n. 2, p. 165-176, 2002.

TAHA, A. et al. Environmental drivers of *Euphorbia resinifera* seed germination and seedling establishment for conservation purpose. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e281196, 2024.

TAVARES, Válter Cardoso; ARRUDA, Ítalo Rodrigo Paulino de; SILVA, Danielle Gomes de. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019.

VANDERLEI, Renato Soares et al. Extensive clonal propagation and resprouting drive the regeneration of a Brazilian dry forest. **Journal of Tropical Ecology**, v. 37, n. 1, p. 35-42, 2021.

VANDERLEI, Renato Soares et al. Impoverished woody seedling assemblages and the regeneration of Caatinga dry forest in a human-modified landscape. **Biotropica**, v. 54, n. 3, p. 670-681, 2022.

VIEIRA, Daniel LM; SCARIOT, Aldicir. Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration. **Restoration ecology**, v. 14, n. 1, p. 11-20, 2006.

VIEIRA, Ima Célia Guimarães; PROCTOR, John. Mechanisms of plant regeneration during succession after shifting cultivation in eastern Amazonia. **Plant Ecology**, v. 192, n. 2, p. 303-315, 2007.

VIOLLE, Cyrille et al. Let the concept of trait be functional! **Oikos**, v. 116, n. 5, p. 882-892, 2007.

WALL, D. H., BARDGETT, R. D., SNELGROVE, P. V. R., & COVICH, A. R..The need for understanding how biodiversity and ecosystem functioning affect ecosystem services in soils and sediments. In D. H. Wall (Ed.), *Sustaining biodiversity and ecosystem services in soils and sediments*. **Island Press**. Scope; Vol. 64, 2004.

WESTOBY, Mark et al. Plant ecological strategies: some leading dimensions of variation between species. **Annual review of ecology and systematics**, v. 33, n. 1, p. 125-159, 2002.

WHITFORD, Walter G.; DUVAL, Benjamin D. Ecology of desert systems: Cap. 8 Consumers and Their Effects. **Academic Press**, 203-263, 2019.

WIEGAND, Thorsten; MARTÍNEZ, Isabel; HUTH, Andreas. Recruitment in tropical tree species: revealing complex spatial patterns. **The American Naturalist**, v. 174, n. 4, p. E106-E140, 2009.

XUE, Wei et al. Soil nutrient heterogeneity alters productivity and diversity of experimental plant communities under multiple global change factors. **Oikos**, v. 2023, n. 12, p. e10189, 2023.

ZONA, Scott. Fruit and seed dispersal of *Salvia* L.(Lamiaceae): a review of the evidence. **The Botanical Review**, v. 83, n. 2, p. 195-212, 2017.

9. APÊNDICE — ATRIBUTOS DAS SEMENTES

Tabela 3 — Atributos morfofuncionais e estratégias de dispersão das espécies presentes na chuva de sementes em solos cristalinos e sedimentares.

Família	Espécie	Síndrome de dispersão	Vetor de dispersão	Forma	Dormência	Tolerância à dessecação	Estruturas atrativas	Presença em geomorfologia
Anacardiaceae	<i>Astronium urundeuva</i>	Abiótica	Anemocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Não	Cristalino
Apocynaceae	<i>Aspidosperma pyrifolium</i>	Abiótica	Anemocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Cristalino
	<i>Aspidosperma multiflorum</i>	Abiótica	Anemocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Sedimentar
Burseraceae	<i>Commiphora leptophloeos</i>	Biótica	Endozoocoria	Alongada	Não	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
Cactaceae	<i>Harrisia adscendens</i>	Biótica	Endozoocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
Convolvulaceae	<i>Ipomoea (sp1)</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Não	Cristalino
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum pungens</i>	Biótica	Endozoocoria	Elipsóide	Não	Recalcitrante	Sim	Sedimentar
Euphorbiaceae	<i>Jatropha mutabilis</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Sedimentar
	<i>Jatropha mollissima</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Cristalino
	<i>Manihot carthagenensis</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
	<i>Cnidoscolus quercifolius</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Cristalino
	<i>Cnidoscolus urens</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
	<i>Croton adamantinus</i>	Abiótica	Autocoria	Elipsóide	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar
	<i>Cnidoscolus bahianus</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Sedimentar
	<i>Croton tricolor</i>	Abiótica	Autocoria	Elipsóide	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino

	<i>Cnidoscolus obtusifolius</i>	Abiótica	Autocoria	Esférica	Não	Ortodoxa	Sim	Sedimentar
	<i>Croton blanchetianus</i>	Abiótica	Autocoria	Elipsóide	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
	<i>Croton echiodides</i>	Abiótica	Autocoria	Elipsóide	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar e Cristalino
Fabaceae	<i>Pityrocarpa moniliformis</i>	Abiótica	Barocoria	Achatada	Sim	Ortodoxa	Não	Sedimentar
	<i>Senegalia piauiensis</i>	Abiótica	Autocoria	Elipsóide	Não	Ortodoxa	Não	Sedimentar e Cristalino
	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Abiótica	Barocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Cristalino
	<i>Mimosa ophthalmocentra</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Sim	Ortodoxa	Não	Sedimentar e Cristalino
	<i>Cenostigma pyramidale</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Cristalino
	<i>Cenostigma microphyllum</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Sedimentar
	<i>Bauhinia cheilantha</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Não	Ortodoxa	Não	Sedimentar
	<i>Piptadenia retusa</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Sim	Ortodoxa	Não	Sedimentar e Cristalino
	<i>Mimosa tenuiflora</i>	Abiótica	Autocoria	Achatada	Sim	Ortodoxa	Não	Sedimentar
Malpighiaceae	<i>Byrsonima vacciniifolia</i>	Biótica	Endozoocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Sim	Sedimentar
Rutaceae	<i>Balfourodendron molle</i>	Abiótica	Anemocoria	Elipsóide	Sim	Ortodoxa	Não	Cristalino
Sapindaceae	<i>Cardiospermum corindum</i>	Abiótica	Anemocoria	Esférica	Sim	Ortodoxa	Não	Cristalino