



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Efeito das variações sazonais e interanuais do clima na fenologia reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* tul. (Fabaceae) em um remanescente de floresta estacional semidecidual, Piauí

Bruno Ayron de Souza Aguiar^{1*}, Elda Simone dos Santos Soares², Mariana Lenara de Andrade Masrua³, Maria Jaislanny Lacerda e Medeiros⁴, Clarissa Gomes Reis Lopes⁵, Gardene Maria de Sousa⁶

¹Doutor em Botânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Professor Externo, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA), Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga, Teresina, Piauí, Brasil. bruno_ayron@hotmail.com (autor correspondente). ²Mestre em Botânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Pós-graduação em Botânica, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n - Dois Irmãos, Recife, Brasil. eldasimony@hotmail.com. ³Especialista em Ecologia pela Universidade Federal do Piauí - CEAD, Técnico administrativo em Educação (UFPI), Centro de Ciências da Saúde, Departamento de Nutrição, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga, Teresina, Piauí, Brasil. marianalenara@ufpi.edu.br. ⁴Doutora em Biologia Vegetal pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Professora Adjunta III, Centro de Ciência as Natureza, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga, Teresina, Piauí, Brasil. jaislanny@ufpi.edu.br. ⁵Doutora em Botânica pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Professora Associada III, Centro de Ciência as Natureza, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga, Teresina, Piauí, Brasil. claris-lobes@hotmail.com. ⁶Doutora em Ciências/Botânica pela Universidade de São Paulo (USP), Professora Associada IV, Centro de Ciência as Natureza, Universidade Federal do Piauí (UFPI), Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Bairro Ininga, Teresina, Piauí, Brasil. gardene@ufpi.edu.br.

Artigo recebido em 23/09/2023 e aceito em 09/03/2024

RESUMO

As mudanças climáticas estão anualmente afetando a ocorrência, duração e intensidade dos eventos fenológicos das populações arbóreas em florestas tropicais sazonalmente secas. Neste trabalho foi testada a hipótese de que as alterações na ocorrência e sincronia da fenologia reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* Tul. estão associadas às variações anuais e sazonais do clima. O estudo foi realizado durante 24 meses em remanescente de floresta estacional semidecidual no Piauí, nordeste do Brasil. Foram feitas observações das fenofases de botões florais, floração, frutificação e deiscência dos frutos em 15 indivíduos da espécie. Foi estimada a intensidade e atividade de cada fenofase. Análises estatísticas circulares foram utilizadas para inferir o comportamento sazonal e a sincronia fenológica da espécie. A floração da espécie foi sazonal e síncrona, iniciando no final da estação seca. A frutificação apresentou padrão contínuo, porém seguido por apenas um episódio de floração em cada ano. Os frutos entraram em processo de deiscência na estação seca, findando no início da emissão de novos botões florais. A floração correlacionou ao aumento da precipitação, enquanto a redução das chuvas, redução da umidade relativa do ar e o aumento da temperatura correlacionaram à deiscência dos frutos. Observamos variações anuais nos picos de intensidade da floração e frutificação, embora a deiscência dos frutos tenha se mantido sincronizada entre os anos. Mudanças nos padrões fenológicos da espécie ao longo dos anos suscitam preocupações, sobretudo considerando as mudanças climáticas em curso, que têm o potencial de afetar a sincronia das populações da espécie e, conseqüentemente, seu sucesso reprodutivo.

Palavras-chave: árvore, floração, frutificação, seca, mudanças climáticas

Effect of seasonal and interannual climate variations on the reproductive phenology of *Cenostigma macrophyllum* tul. (Fabaceae) in a remnant of seasonal semi-deciduous forest, Piauí.

ABSTRACT

Climate change is annually affecting the occurrence, duration, and intensity of phenological events in tree populations in seasonally dry tropical forests. This study tested the hypothesis that changes in the occurrence and synchrony of reproductive phenology of *Cenostigma macrophyllum* Tul. are associated with annual and seasonal variations in climate. The study was conducted over 24 months in a remnant of seasonal semi-deciduous forest in Piauí, northeastern Brazil. Observations of budburst, flowering, fruiting, and fruit dehiscence were made on 15 individuals of the species. The intensity and activity of each phenophase were estimated. Circular statistical analyses were used to infer the seasonal behavior and phenological synchrony of the species. The species' flowering was seasonal and synchronous, starting at the end of the dry season. Fruiting showed a continuous pattern, but was followed by only one flowering episode each year. Fruits began to dehisce in the dry season, ending at the beginning of the new budburst. Flowering correlated with increased

4279

precipitation, while reduced rainfall, decreased relative humidity, and increased temperature correlated with fruit dehiscence. We observed annual variations in the peaks of flowering and fruiting intensity, although fruit dehiscence remained synchronized between years. Changes in the species' phenological patterns over the years raise concerns, especially considering ongoing climate change, which has the potential to affect the synchrony of the species' populations and, consequently, its reproductive success.

Keywords: Tree. Flowering. Fruiting. Drought. Climate Change.

Introdução

As florestas tropicais e subtropicais, apesar de ocuparem apenas 7% da superfície terrestre, possuem metade da densidade global de árvores (~40.000 espécies), e armazenam até 25% do carbono terrestre (Quesada-Román et al., 2022). Dentre estas, as florestas tropicais sazonalmente secas (FTSS) se destacam, representando 42% das florestas tropicais do mundo e abrigam uma diversidade de espécies arbóreas com alto grau de endemismo (García-Cervigón et al., 2020).

Nestes ambientes, o quantitativo e a frequência das precipitações é o principal fator limitante que influencia o tempo dos eventos fenológicos vegetativo e reprodutivo destas espécies vegetais (Richardson et al., 2013; Zeppel et al., 2014; Miranda et al., 2014; Luna-Nieves et al., 2022; Ivanov et al., 2022). Além disso, mudanças no comportamento fenológico do estrato arbóreo também são atribuídas às oscilações sazonais da temperatura (Menzel, 2005; Schleip et al., 2008; Bartomeus et al., 2010; Volder et al., 2013; Mendoza e Morellato, 2017; Singh et al., 2024), redução e aumento da umidade relativa do ar (Seghieri et al., 2009), bem como o fotoperíodo (Alberton et al., 2017; Silva et al., 2023a), e às relações bióticas, como a disponibilidade de dispersores, polinizadores e herbívoros (Morellato et al., 2016; Cortés-Flores et al., 2023).

Apesar da sensibilidade fenológica das espécies arbóreas da FTSS à tendência de aumento gradual da temperatura e da aridez ao longo do tempo, o funcionamento anual da floresta tem demonstrado alta resiliência às condições extremas de seca (Huang et al., 2021; Silva et al., 2023b). Tal fato é evidenciando pelos avanços significativos dessas FTSS, nas regiões semiáridas, substituindo outras formações florestais mais úmidas (Huang et al., 2016; Vieira et al., 2021). A resiliência destas florestas secas pode ser atribuída às adaptações ou ajustes que foram desenvolvidos ao longo do tempo no processo evolutivo das plantas, mecanismos estes para a economia de água e para lidar com mudanças na temperatura (Chaves, 2002; Vicente-Serrano et al., 2013). Tais adaptações incluem estratégias de tolerância ou evasão ao estresse ambiental (Jongen et al., 2015; Carvalho e Sartori, 2015; Méndez-Toribio et al., 2020), as quais se refletem em diferentes formas eficientes de armazenamento e uso da água e nutrientes,

quando as condições ambientais críticas se estabelecem (Neves et al., 2022).

No entanto, ainda existem lacunas no conhecimento dos padrões temporais fenológicos do estrato arbóreo, as quais podem ser cruciais para compreender o funcionamento e o destino dessas florestas tropicais secas (Souza et al., 2021; Davis et al., 2022), especialmente em um mundo que enfrenta mudanças climáticas extremas e onde a perda de cobertura arbórea já é significativa (Ripple et al., 2023). Algumas questões não compreendidas podem restringir as estratégias de mitigação desses efeitos, como o manejo e a coleta de sementes para futuros esforços de reflorestamento em compensação à perda florestal (Silva et al., 2023b).

As mudanças no clima para as regiões tropicais e subtropicais secas, previstas para este século, são de reduções de mais de 30% da precipitação e aumento da temperatura global em até 4°C (PBMC, 2014; IPCC, 2022), e indicam que as consequências poderão ter impactos significativos em níveis intraespecíficos e interespecíficos, além de afetar todos os ecossistemas terrestres e aquáticos, e a sociedade humana de forma abrangente nestas regiões (Pei et al., 2015; Mendoza e Morellato, 2017; Ripple et al., 2023). A região nordeste do Brasil, que inclui o estado do Piauí, enfrenta desde 2011 um clima atípico caracterizado pelo prolongamento das estiagens e aumento da temperatura (Marengo et al., 2017). O fenômeno El Niño agravou a situação de seca que teve início em 2012, e os impactos dessa mudança extrema ainda não foram quantificados na comunidade vegetal, mas está contribuindo significativamente para o processo de desertificação na região nordeste (Cunha et al., 2019; Vieira et al., 2021; Marengo et al., 2022).

A floração e frutificação são eventos cruciais para a persistência das espécies arbóreas no ambiente, que desenvolvem múltiplas estratégias fenológicas reprodutivas (Luna-Nieves et al., 2022; Ivanov et al., 2022; Singh et al., 2024). Dentre essas estratégias, destacam-se três que diferem no tempo nas FTSS, cada uma com seu *timing* específico: a) florescimento e frutificação exclusivamente na estação chuvosa; b) floração na estação chuvosa e frutificação na estação seca; c) florescimento e frutificação exclusivamente na

estação seca, sendo esta uma tendência para maioria destas árvores (Luna-Nieves et al., 2017, 2022; Singh et al., 2024). Como exemplo, as plantas lenhosas das florestas secas do nordeste brasileiro são altamente sazonais, com início da produção de folhas e flores no início do período chuvoso, com frutificação durante e ao final da estação chuvosa, em épocas de maior disponibilidade hídrica, seguida pela queda de folhas durante a estação seca (Lima e Rodal, 2010; Oliveira et al., 2015; Neves et al. 2022; Silva et al., 2023a). Dentro da estação seca, algumas espécies arbóreas ainda podem concentrar a sua floração, utilizando os recursos retidos no caule pela completa ou parcial caducifolia (Lima et al., 2021; Wright et al. 2021; Medeiros et al., 2024). Essas respostas ressaltam a diversidade de estratégias fenológicas nas FTSS para tolerar as condições de seca do ambiente.

No entanto, devido às alterações climáticas especificadas, decorrentes do aquecimento global, é possível que o ciclo de vida destas plantas esteja sendo perturbados temporalmente, se expressando em antecipação, atrasos ou inibição das fenofases (Lesica e Kittelson, 2010; Dunnell e Travers, 2011; Zeppel et al., 2014; Ivanov et al., 2022; Davis et al., 2022; Geissler et al., 2023). Esses desajustes fenológicos podem afetar a sincronia das populações vegetais, resultando em consequências negativas, tais como surtos de pragas, redução na produção de plantas e desequilíbrios na manutenção das interações mutualísticas entre espécies, como as interações planta-animal (Morellato et al., 2016).

Nesse sentido, nos últimos anos, tem havido um aumento significativo no interesse pelos estudos fenológicos nos trópicos, os quais se configuram como uma ciência ambiental integradora focada no monitoramento, compreensão e previsão de eventos recorrentes do ciclo de vida das plantas e, principalmente, sua relação com as mudanças climáticas emergentes (Morellato et al., 2016; Alberton et al., 2017; Abernethy et al., 2018; Davis et al., 2022). Isso ocorre porque, além de compreender a variabilidade fenológica presente em ecossistemas secos e úmidos, os estudos das respostas das plantas funcionam como indicadores dos impactos provocados pelas mudanças climáticas e atividades humanas (Richardson et al., 2013; Corlett, 2016; Abernethy et al., 2018). Assim, tornam-se uma importante ferramenta para estudar, relatar e gerenciar a biodiversidade ameaçada (Pereira et al., 2013), promovendo estratégias de conservação e

construção de programas de restauração ecológica (Morellato et al., 2016).

Para este estudo fenológico, utilizamos uma espécie conhecida popularmente como Caneleiro (*Cenostigma macrophyllum* Tul.), uma leguminosa arbórea que formam populações abundantes e dominam a paisagem na capital do Piauí (Aguiar et al., 2016; Aguiar et al., 2019), além de se estender pela Caatinga (stricto sensu), Carrasco, Cerrado (lato sensu), Floresta Ciliar ou Mata de Galeria no Brasil (Gaem, 2021, 2024). Assim, partindo dos pressupostos supracitados, hipotetizamos que as alterações no tempo e na sincronia da fenologia reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* Tul. podem ser diferentes entre anos e associadas às variações anuais e sazonais da precipitação, temperatura e umidade relativa do ar em um remanescente de floresta estacional semidecidual no Piauí. Portanto, nosso estudo buscou responder a seguintes questões: (i) O comportamento fenológico reprodutivo de *C. macrophyllum* obedece a um padrão ou tendência sazonal entre anos? (ii) Existem diferenças nas respostas reprodutivas de *C. macrophyllum* diante das variações sazonais e interanuais do clima? (iii) Existe correlação entre a precipitação, temperatura e umidade relativa com o comportamento reprodutivo de *C. macrophyllum*?

Material e métodos

Área de Estudo

O estudo foi realizado em áreas de remanescente de floresta estacional semidecidual do Bioparque Zoobotânico de Teresina, Piauí, (5°02'40.3"S; 42°46'42.5"W) no período de agosto de 2011 a julho de 2013. O Bioparque é uma área ecotonal e apresenta alguns gêneros amazônicos de distribuição brasileira, além de espécies do Cerrado e Caatinga (Aguiar et al., 2014, Aguiar et al., 2016; Aguiar et al., 2019). A área possui 137 hectares de área verde destinada à proteção que está situada no setor nordeste do perímetro urbano da cidade de Teresina, entre o rio Poti, e a PI-112. A cidade de Teresina, capital do Piauí, está localizada numa zona de transição entre o Nordeste e a Amazônia (Meio-Norte), cercada pela Mata de Cocais, Cerrados e Cerradões. De acordo com a classificação climática de Köppen, a precipitação média anual da cidade, é de 1.339 mm (50 pol.), sendo que nos meses de janeiro a maio concentram-se cerca de 60% do volume das chuvas

Espécie estudada

O gênero *Cenostigma* Tul. inclui árvores e arbustos com hibridização interespecífica e alta

diversidade no Nordeste do Brasil (Caatinga) (Castro et al., 2023). Inicialmente, era considerado um gênero endêmico do Brasil e compreendia apenas duas espécies: *Cenostigma macrophyllum* Tul. e *Cenostigma Tocatinum* Ducke (Warwick e Lewis, 2009). Atualmente, o gênero é composto por 14 espécies e sete variedades, totalizando 21 táxons (Gagnon et al., 2016; Gaem, 2021, 2024). A espécie *C. macrophyllum* é conhecida popularmente como caneleiro pelo aspecto do caule sulcado (Figura 1. a), e possui hábito arbóreo ou arbustivo, apresentando ampla distribuição nos Biomas Caatinga, Cerrado, podendo se encontrado no Amazônico (Gaem, 2021, 2024). É uma espécie relativamente comum do centro-sul do Piauí (Queiroz, 2009) e símbolo da capital Teresina (Piauí), nordeste brasileiro, através do decreto municipal nº 2.407, de 13 de agosto de 1993 (Soares, 2001). É amplamente utilizada na arborização e paisagismo da cidade, podendo ser encontrada nas praças e avenidas principais de Teresina (PI) (Aguiar et al., 2014; Aguiar et al., 2016; Aguiar et al., 2019).

Fenologia Reprodutiva

Foram selecionados e marcados aleatoriamente 15 indivíduos adultos de *C. macrophyllum*, localizados nas trilhas ecológicas do Bioparque Zoobotânico, árvores que apresentavam mais de 15 metros de altura (Figura 1. a). Durante um período de dois anos, esses indivíduos foram monitorados mensalmente quanto à atividade (presença/ausência) e intensidade (magnitude) de suas fenofases reprodutivas, abrangendo as fenofases de botões florais, floração, frutificação e deiscência dos frutos (conforme mostrado na Figura 1). A fenofase de botões florais envolveu o acompanhamento mensal do desenvolvimento inicial da inflorescência racemosa e a presença de botões florais (Figura 1. b,c). A fenofase de floração incluiu o estágio em que as flores estavam abertas (Figura 1. c,d), enquanto a frutificação compreendeu o período desde a formação inicial

das vagens, logo após a polinização, até sua completa maturação (Figura 1. e,f). O processo final de maturação dos frutos é representado pela fenofase de deiscência dos frutos, que envolveu a abertura dos frutos e a dispersão das sementes (Figura 1. f).

O “Ano 1” abrangeu o período de agosto de 2011 a julho de 2012, enquanto o “Ano 2” correspondeu ao período de agosto de 2012 a julho de 2013. Foram feitas observações apenas qualitativas quanto ao período de brotamento e abscisão foliar. As variáveis abióticas (pluviometria, temperatura média e umidade relativa) foram obtidas através dos dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) referente à estação meteorológica localizada na EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) em Teresina (Teresina-A312; Código OMM: 81827; Latitude: -5.034769°, L: -42.801341°; Altitude: 75 metros) localizada cerca de 2,17km da área de estudo. As estações secas e chuvosas dos anos de estudo foram estabelecidas com base no período médio em que se registraram os menores e maiores índices pluviométricos, respectivamente. A estação chuvosa abrange o período de janeiro a maio, enquanto a estação seca ocorre de agosto a novembro. Dezembro corresponde ao mês de transição entre a estação seca e a chuvosa, e julho marca a transição entre a estação chuvosa e a seca.

Para estimar a intensidade de cada fenofase foi utilizado o método semi-quantitativo de Fournier (1974), que consiste em classificar cada indivíduo dentro de uma escala intervalar semi-quantitativa de cinco categorias (0 a 4), com intervalo de 25% de amplitude entre elas. A atividade fenológica foi medida na população, representando a porcentagem de indivíduos que se encontravam em cada fenofase (Bencke e Morellato, 2002). Os padrões fenológicos da espécie foram classificados de acordo com a frequência de cada fenofase adaptado de Newstrom et al. (1994), como anual (floração breve, intermediária ou prolongada) ou contínuo.

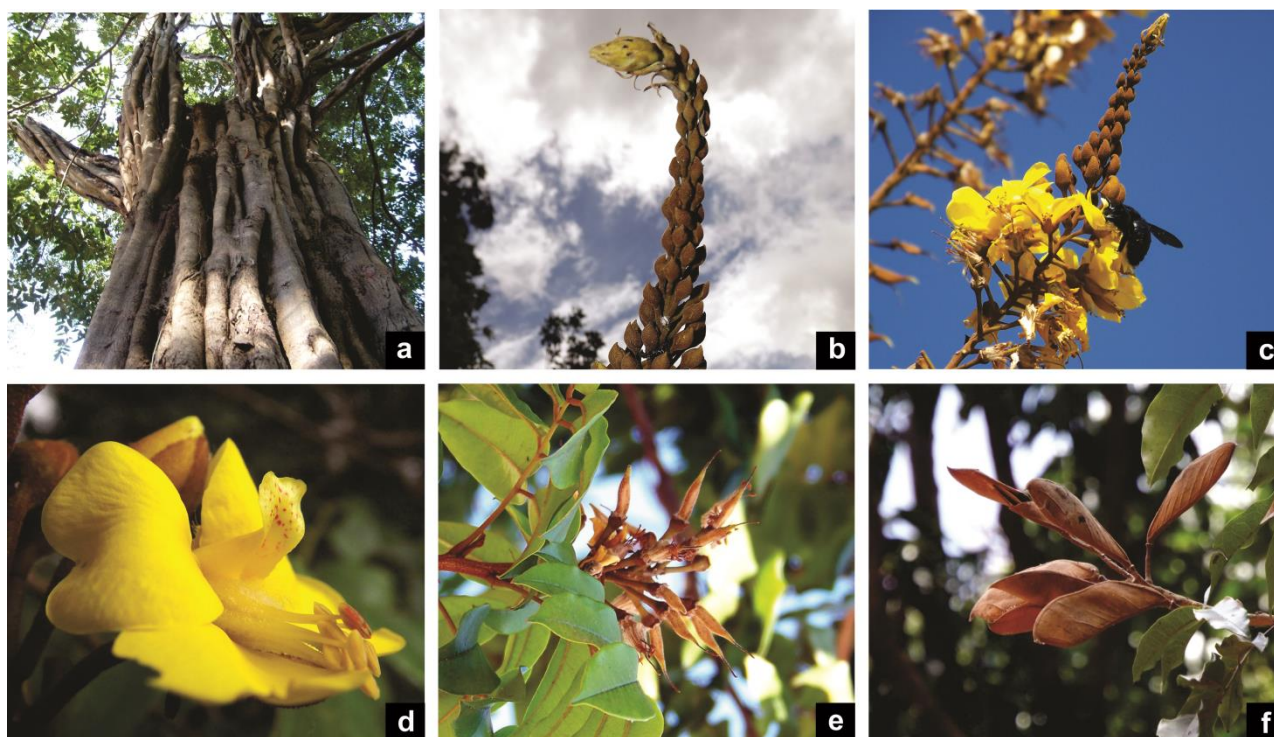


Figura 1. Aspectos vegetativos e reprodutivos de *Cenostigma macrophyllum*Tul. (Fabaceae) em Teresina, Piauí: (a) caule sulcado; (b) botões florais; (c) inflorescência racemosa; (d) flor; (e) frutos imaturos; (f) frutos em processo de deiscência.

Análises estatísticas

Foram realizadas análises estatísticas circulares para identificar o comportamento sazonal da espécie e diferenças entre anos na sincronia dos eventos fenológicos, conforme descrito em Morellato et al. (2010), utilizando o software Oriana versão 4.2 (Kovach, 2022). Para o cálculo dos parâmetros estatísticos circulares, os meses de acompanhamento das fenofases foram convertidos em ângulos, dividindo 360° pelos 12 meses do ano. As variáveis aferidas foram o ângulo médio (μ), o desvio padrão circular (DPC) e o vetor (r). O valor do ângulo médio ou data média (μ) determina o período médio do ano em que a fenofase ocorreu em maior intensidade na população. O comprimento do vetor (r) afere a magnitude do efeito da sazonalidade sobre a fenologia, e também a sincronia da população, variando de 0 a 1 sendo a baixa sazonalidade ou menor sincronia correspondente ao $r \leq 0,5$ (Morellato et al., 2000, 2010). O teste de Rayleigh foi aplicado, e sua significância ($p < 0,05$) avalia a uniformidade dos eventos fenológicos em torno da data média ou ângulo médio (μ). Em outras palavras, ele determina se a fenofase ocorre em um período específico do ano ou se estende de forma contínua ao longo do período de estudo.

As diferenças entre os anos de estudo em cada fenofase foram avaliadas pelo teste de

Watson-Williams (teste F) utilizando o software Oriana 4.2 (Kovach, 2022). A dispersão da amostra foi previamente testada pelo Teste U^2 de Watson para verificar a presença da distribuição de Von Mises, necessária para a realização do teste F. Foram empregadas correlações circulares (Fisher, 1995) para investigar a possível associação entre o índice de atividade das fenofases e os fatores ambientais abióticos (precipitação, temperatura e umidade relativa do ar). Essa abordagem permite não apenas quantificar a força e a direção dessas relações, mas também identificar padrões circulares que mostram como os fatores ambientais influenciam os estágios fenológicos. Seguindo a classificação de Cann (2002) os coeficientes de correlação (r_s) significativos ($p < 0,05$) foram usados para indicar a magnitude das relações, sendo os valores negativos a existência de correlações inversamente proporcionais.

Resultados

A floração de *C. macrophyllum* iniciou no final da estação seca, que perdurou por 6 meses (outubro a março) no primeiro ano de estudo e por 7 meses (novembro a maio) para o segundo ano. Em 2011, a emissão de botões florais (Figura 1.b; Figura 2) ocorreu em maior intensidade (62,5%) em novembro, com alta sincronia ($r=0,85$) e significativa sazonalidade (Tabela 1). No entanto,

a emissão de botões florais seguinte, ocorre em maior intensidade apenas no mês de fevereiro de 2013 (26,6%; $p < 0,01$), sendo síncrono na população e prevalecendo uma tendência sazonal (Figura 2; Tabela 1). É importante destacar que, no mês de maior intensidade, 100% dos indivíduos no Ano 1 emitiram botões florais, enquanto apenas 57,1% no Ano2 estavam em atividade. Logo, os picos de intensidade desta fenofase diferiram estatisticamente, mostrando um padrão diferente na emissão de botões florais entre anos ($F = 265,4$; $p < 0,01$).

A floração (Figura 1.c,d) foi sazonal ($p < 0,01$), apresentando maior intensidade (60%) e alta sincronia ($r = 0,86$) em dezembro de 2011. Para a floração seguinte, seguiu um padrão sazonal ($p < 0,01$) e síncrono ($r = 0,65$), porém com maior intensidade em março de 2013, não ultrapassando 35% de intensidade (Figura 2; Tabela 1). No primeiro ano, 100% dos indivíduos estavam em atividade no pico da floração, enquanto apenas 73% foram verificados no segundo ano. Isto ocorreu porque determinadas árvores não

apresentaram floração e consequentemente não houve formação de frutos. Constatamos que os picos de intensidade da fenofase de floração diferiram entre anos ($F = 274,2$; $p < 0,01$).

A frutificação (Figura 1.e,f) apresentou padrão contínuo, pois foram observados, mesmo que em baixa frequência, a presença de frutos durante os 24 meses de estudo, seguido por apenas um episódio de floração em cada ano. Apesar da sazonalidade aferida na frutificação ($p < 0,01$), os valores do vetor (r) foram considerados baixos (Ano1=0,36; Ano 2=0,44), o que reforça o padrão contínuo, ou seja, uma distribuição próxima a uniformidade ao longo do ano (Figura 2, 3; Tabela 1). Em 2012, 100% dos indivíduos estavam em atividade no final da estação chuvosa, perdurando pela estação seca, com maior intensidade em maio (100%) (Figura 2, 3). Em 2013, a maior intensidade de frutificação foi em junho não ultrapassando 68% (Figura 2, 3), com apenas 86% dos indivíduos em atividade. Constatamos que os picos de intensidade da fenofase de frutificação também diferiram entre anos ($F = 123,3$; $p < 0,01$).

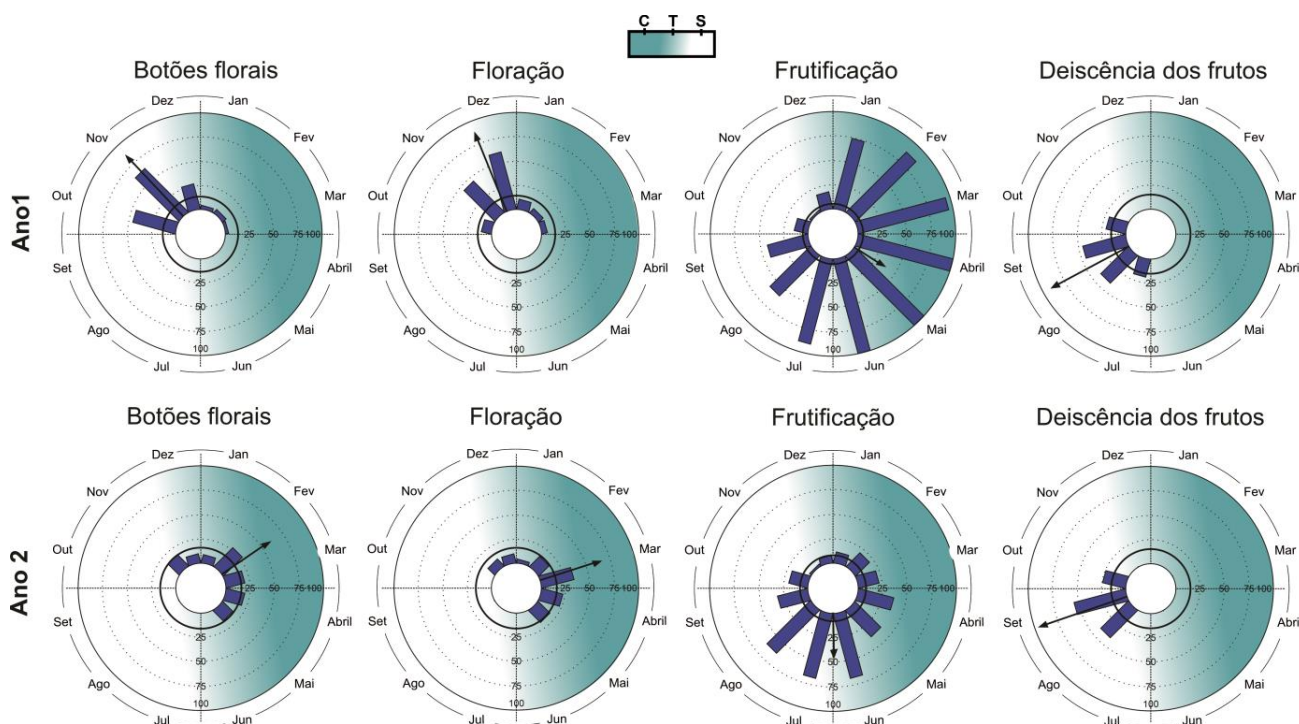


Figura 2. Análise do padrão sazonal na fenologia reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* Tul. (Fabaceae) referente aos meses de agosto de 2011 a julho de 2013 no Bioparque Zoobotânico de Teresina, PI. Ano 1 = Agosto de 2011 a julho de 2012; Ano 2 = Agosto de 2012 a julho de 2013; C = estação chuvosa; S = estação seca; T = transição das estações

Os frutos entraram em processo de deiscência (Figura 1.f) na estação seca, de agosto a outubro em 2011, e de Julho a outubro em 2012, findando no início da emissão de novos botões

florais. Em 2011, a deiscência foi sazonal e síncrona ($p < 0,01$; $r = 0,89$), com maior intensidade em setembro (46,4%), quando 85% da população estavam em atividade (Figura 2, 3). Em 2012,

pôde-se observar uma alta sincronia da população ($r=0,94$) com maior intensidade em setembro (54,6%), no qual 93% dos indivíduos estavam em atividade. Na dispersão das sementes, a maioria permanecia no solo, aguardando as primeiras precipitações para sua germinação. Foi constatada que a dispersão dos frutos é autocórica, realizada nas horas mais quentes do dia (12h-15h), podendo ser ouvido os “estalos” de sua dispersão. Parte da

estrutura externa (epicarpo) dos frutos pode permanecer na planta mãe temporariamente ou cair diretamente no solo. Após alguns dias, algumas sementes dispersas podem desaparecer do local, o que sugere a possível presença de um segundo dispersor ainda não identificado. Diferente das outras fenofases, verificamos que os picos de intensidade na deiscência dos frutos foram sincronizados entre anos ($F=9,4$; $p>0,05$).

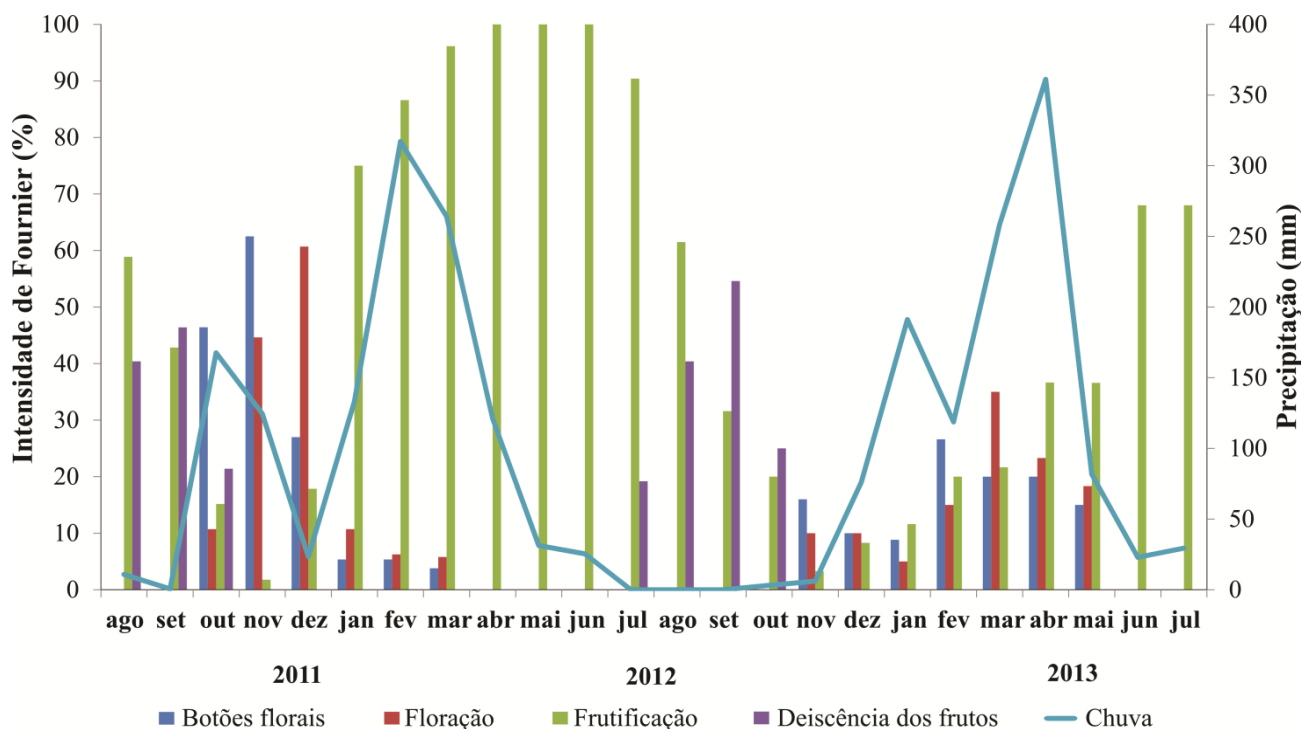


Figura 3. Análise linear quantitativa da precipitação e fenologia reprodutiva de *Cenostigma macrophyllum* Tul. (Fabaceae) no Bioparque Zoobotânico de Teresina, Piauí, Brasil. Fonte dos dados climáticos: INMET.

Tabela 1. Estatísticas circulares das fenofases (botões, flores e frutos imaturos e frutos deiscetes) em *Cenostigma macrophyllum* Tul. referente ao período de agosto de 2011 a julho de 2013 realizado no Bioparque Zoobotânico de Teresina, Piauí.

Variáveis	Botões florais		Floração		Frutificação		Deiscência	
	Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2	Ano 1	Ano 2
μ	316,4°	56,09°	337,5°	72,3°	122,2°	179,2°	241,52°	251,14°
Mês (μ)	novembro	fevereiro	dezembro	março	maio	junho	setembro	setembro
r	0.855	0.591	0.86	0.65	0.365	0.449	0.894	0.94
DPC	32,093°	58,736°	31,503°	53,228°	81,301°	72,477°	27,089°	20,114°
Teste Rayleigh (Z)	109.606	40.905	103.474	48.938	104.815	78.528	100.761	106.086
Teste Rayleigh (p)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05
Teste Watson's U ² (p)	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05	< 0.05

r- vetor (medida de concentração); μ - ângulo médio; DPC – desvio padrão circular; Teste de Rayleigh Z; p- medida de significância do ângulo médio.

Foi verificado de forma descritiva o período de abscisão das folhas, que ocorreu no início da estação seca, a partir de agosto, mas não havendo a queda total das mesmas. No final da estação seca e transição da estação chuvosa

(novembro-dezembro), ocorre a emissão de uma nova folhagem junto à emissão de botões florais.

Houve correlação circular positiva entre as chuvas e a fenofase de botões florais ($r_s=0,46$; $p<0,05$) e floração ($r_s=0,45$; $p<0,05$). Houve

correlação circular negativa entre as chuvas e deiscência dos frutos ($r_s = -0.45$; $p < 0,05$), porém sem correlação com a frutificação ($r_s = -0,02$; $p > 0,05$). Verificamos uma correlação positiva entre as temperatura e deiscência dos frutos ($r_s = 0.48$; $p < 0,05$). Houve correlação negativa da umidade relativa do ar e deiscência dos frutos ($r_s = -0.45$; $p < 0,05$). Não constatamos correlação ($p > 0,05$) entre a temperatura e umidade relativa do ar ($p > 0,05$) com as fenofases de botões florais, floração e frutificação.

Discussão

C. macrophyllum apresentou um comportamento sazonal para as fenofases reprodutivas, com exceção da frutificação que foi distribuída de forma contínua durante os anos de estudo. A floração foi considerado do tipo anual, regular e prolongada, seguindo a metodologia de Newstrom et al. (1994), por apresentar apenas um ciclo de floração por ano com duração acima de 5 meses. O padrão de floração desta espécie pode variar significativamente, dependendo do local em que se encontra, seja em uma área antropizada (ambiente urbano) ou em processo de regeneração após perturbações ambientais. Isso evidencia sua notável sensibilidade às condições do ambiente em que está inserida. Tal fato pode ser confirmado, pois *C. macrophyllum*, em áreas em regeneração pós-perturbação, tem um padrão de florescimento contínuo, de baixa sincronia e de longa duração. A formação de botões e flores para esta espécie nestas áreas perturbadas ocorre continuamente, contudo em baixa intensidade nos meses de seca (Souza e Nascimento, 2018).

De modo geral, as árvores encontradas nas florestas tropicais secas desenvolveram estratégias fenológicas que demonstram variações temporais na ocorrência de cada fenofase, ajustando-se às secas recorrentes (Richardson et al., 2013; Zeppel et al., 2014; Oliveira et al., 2015; Ivanov et al., 2022; Silva et al., 2023a). Estratégias que refletem a alta resiliência e resistência do estrato arbóreo a essas condições de estiagem (Huang et al., 2021). Nesse contexto, é importante destacar que as oscilações na precipitação emergem como o principal fator (gatilho) determinante da fenologia das espécies vegetais (Richardson et al., 2013; Zeppel et al., 2014; Miranda et al., 2014; Luna-Nieves et al., 2022), enquanto as variações anuais de temperatura aparentemente desempenham um papel secundário (Anderson et al., 2005; Stevenson et al., 2008; Volder et al., 2013; Mendoza e Morellato, 2017; Silva et al., 2023a). Essas influências ambientais podem se manifestar de

diferentes maneiras, resultando em eventos de floração e frutificação que ocorrem exclusivamente em uma estação específica ou em períodos distintos (Luna-Nieves et al., 2017; Ivanov et al., 2022). Quando corre exclusivamente na seca, é essencial para manter a abundância de polinizadores/dispersores neste período crítico (Singh et al., 2024), o qual pode ser vantajoso para o sucesso reprodutivo das espécies arbóreas e para sobrevivência da fauna associada.

Existem vários padrões de florescimento e frutificação em leguminosas arbóreas, e quando se analisa a comunidade de modo geral, a floração e frutificação tem uma tendência contínua. Isto significa que diferentes estratégias reprodutivas nas populações podem ser verificadas, com espécies apresentando período de floração definido exclusivamente dentro das estações chuvosas (20%), secas (8%), na transição das estações (8% a 22%) ou continuamente durante todo o ano (27%) (Aguiar et al., 2023). No nosso estudo, identificamos que a ocorrência da floração de *C. macrophyllum* está diretamente correlacionada com os padrões das chuvas, uma vez que o início das primeiras chuvas ou a presença de chuvas irregulares no final da estação seca, atua como o principal gatilho para o início do ciclo reprodutivo da espécie, como constatado por Luna-Nieves et al. 2022 estudando uma comunidade de árvores nas florestas secas.

Como exemplo, e similar ao comportamento do caneleiro, *Handroanthus spongiosus* (Rizzini) S. Grose (Bignoniaceae), uma espécie arbórea endêmica da Caatinga, apresenta uma floração sazonal com padrão anual, com ligeira variação espaço-temporal e correlação positiva as precipitações (Silva et al., 2023a). O mesmo foi constatado com *Dalbergia cearensis* Ducke (Fabaceae), no semiárido do nordeste, em que a floração ocorreu com o início das primeiras chuvas, com frutificação contínua e maturação dos frutos na estação seca (Nogueira et al., 2013). A espécie *Libidibia ferrea* (Fabaceae), que forma populações abundantes na região onde ocorre *C. macrophyllum* (Aguiar et al., 2014, 2016), apresenta um comportamento similar, florescendo de dezembro a fevereiro, iniciando na transição entre as estações seca e chuvosa, com os frutos indeiscentes liberados entre setembro e novembro, no auge da estação seca (Borges et al., 2009, 2012). A floração abundante de *C. macrophyllum* (Aguiar et al., 2016), concentrada durante o período chuvoso, estabelece uma relação simbiótica com riqueza de visitantes florais no ambiente, garantindo uma oferta generosa de recursos florais

(pólen e néctar) para uma diversidade de polinizadores (Aguiar et al. 2016; Cortés-Flores et al, 2023).

Observamos que a frutificação de *C. macrophyllum* se manteve contínua, embora tenha ocorrido apenas um único episódio de floração por ano. Essa continuidade na frutificação sugere que os frutos permaneciam nas árvores por um período prolongado, possivelmente aguardando condições ideais para a dispersão e garantia da germinação das sementes, um padrão que parece ser observado em algumas leguminosas arbóreas (Nogueira et al., 2013; Borges et al., 2012; Souza et al., 2014; Aguiar et al. 2023). É importante destacar que o desenvolvimento dos frutos ocorreu de maneira rápida à medida que as flores são fecundadas, por isso observamos frutos durante todo o ano, mas resultando em uma deiscência sincronizada apenas durante a estação seca.

O principal gatilho para a dispersão das sementes da espécie em questão está associado a altas temperaturas, baixa umidade relativa do ar e ausência da precipitação, com uma relação mais forte quando a umidade atinge níveis críticos no estado do Piauí. É importante considerar que existem condições ideais para a liberação das sementes e as variações na umidade e temperatura é o principal gatilho à deiscência dos frutos secos em muitas espécies arbóreas em florestas tropicais secas (Pedroni et al., 2002; Souza et al., 2014; Luna-Nieves et al., 2017; Mendoza e Morellato, 2017; Miranda et al., 2023). Na Caatinga, cerca de 50% das espécies, incluindo as arbóreas, dispersam suas sementes exclusivamente na estação seca (Souza et al., 2014). Nesta estação, os ventos são mais fortes e a redução na quantidade de folhas nas copas das árvores, são condições específicas que também favorecem a dispersão das sementes (Morellato, 1996, 2016). Em contrapartida, existem comportamentos que contrastam com os fatores abióticos mencionados, não havendo correlações significativas. Nesse contexto, prevalece a autocoria nas leguminosas como uma estratégia adaptativa, para manter o fluxo genético e reduzir a dependência dos indivíduos em relação à fauna para a dispersão de sementes (Souza et al., 2014; Carvalho e Sartori, 2015; Andrella et al., 2023). Essa característica predominante na família pode estar relacionada à história evolutiva das Fabaceae e à sua distribuição e ocupação de áreas, principalmente em biomas secos. A sazonalidade das variáveis climáticas, como chuva e temperatura, molda as características morfológicas das Fabaceae nessas florestas, atuando como um

filtro de seleção para essas características reprodutivas (Andrella et al., 2023).

A alteração dos padrões de floração e frutificação ao longo dos anos levanta sérias preocupações, especialmente diante das mudanças climáticas emergentes, que têm o potencial de afetar o tempo e a sincronia das populações nos trópicos (Morellato, 2016; Luna-Nieves et al., 2022; Davis et al., 2022). Estudos indicam que as plantas podem estar florescendo 2,26 dias mais cedo para cada aumento de 1°C nas temperaturas médias anuais (Geissler et al., 2023). Embora neste estudo o período de floração da espécie permaneça o mesmo, o deslocamento da maior atividade para mais tarde e as reduções na sincronia merecem atenção, o que pode ser resultado da intensificação da estiagem no Piauí durante o período de coleta de dados, que perdura desde 2011 (Cunha et al., 2019; Marengo et al., 2017; Marengo et al., 2022). Todavia, a escassez de dados fenológicos na região e as disparidades nestas respostas reprodutivas em outras populações da espécie (Souza e Nascimento, 2018) resultam em dificuldades na previsão de mudanças fenológicas futuras, na detecção de incompatibilidades fenológicas e na identificação de outras consequências ecológicas (Stuble et al., 2021). Mas em nível dos trópicos, sabe-se que essas diferenças estão induzindo uma dessincronia com o ciclo de vida de outras espécies que participam ativamente dos serviços de polinização e dispersão, o que leva a uma redução significativa da diversidade local da fauna e flora associada (Morellato et al., 2016).

Outro exemplo destas perturbações, é que nas formações vegetacionais do nordeste brasileiro, quando a estação seca se intensifica, a maior parte da frutificação tendem a antecipar e se concentrar no início dessa estação (Figueiredo, 2008; Souza et al., 2014). Esse padrão pode não ser vantajoso para espécies como *C. macrophyllum* que não apresentam dormência nas suas sementes (Aguiar et al., 2016) e, portanto, dependem da germinação imediata com as primeiras chuvas. A dispersão precisa se encaixar perfeitamente com a proximidade do início da estação chuvosa, oferecendo uma vantagem pós-dispersão para as sementes germinarem e, assim, garantir a sobrevivência da prole (Singh et al., 2024). Portanto, se houver um prolongamento das altas temperaturas e índices críticos de baixa umidade relativa do ar, tendências previstas nos modelos climáticos (PBMC, 2014; IPCC, 2023), e que já estão ocorrendo atualmente (Ripple et al., 2023), as sementes da espécie podem ser dispersas antecipadamente, enfrentando condições

desfavoráveis de umidade no solo e, consequentemente, levando à sua mortalidade.

Conclusão

Nosso estudo revela um padrão de frutificação contínuo e floração anual para *C. macrophyllum*. A transição para a estação chuvosa desencadeia a emissão de nova folhagem e botões florais, marcando o reinício do ciclo reprodutivo da espécie. Além disso, observamos que o aumento da temperatura, redução da umidade relativa e redução das chuvas na estação seca desempenham um papel fundamental na deiscência dos frutos. No entanto, um aspecto notável é a variação no período em que ocorre o aumento da intensidade das fenofases reprodutivas ao longo dos anos. Essas variações indicam claramente que as flutuações climáticas exercem uma influência significativa no ciclo reprodutivo da espécie, podendo deslocar o período de maior ocorrência das fenofases. Este achado é particularmente preocupante no contexto das mudanças climáticas em curso, que pode impactar não apenas a própria espécie estudada, mas também toda a rede de interações ecológicas que dependem desses eventos fenológicos, incluindo a polinização e a disponibilidade de recursos para a fauna.

Agradecimentos

Aos órgãos de fomento CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEPI (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Piauí) pelo financiamento da pesquisa. À Universidade Federal do Piauí e ao Laboratório de Ecofisiologia Vegetal e Biologia da Conservação e Laboratório de Morfotaxonomia Vegetal pela infraestrutura e apoio na execução deste trabalho.

Referências

Abernethy, K., Bush, E.R., Forget, P.M., Mendoza, I., Morellato, L.P.C., 2018. Current issues in tropical phenology: a synthesis. *Biotropica* 50, 477-482. <https://doi.org/10.1111/btp.12558>.

Aguiar, B.A.S., Santos, D.M., Andrade, J.R., Sousa, G.M., 2019. Guia didático de árvores do parque zoobotânico de Teresina: uma proposta educativa para conhecimento e preservação da flora do Piauí. In: Seabra, G. (Ed.), *TERRA: objetivos do desenvolvimento sustentável no mundo pandêmico*. Editora Barlavento, pp. 198-210.

Aguiar, B.A.S., Soares, E.S.S., Masrua, M.L.A., Oliveira, M.D.C.P., Lopes, A.V.F., Sousa, G.M., 2016. Biologia floral e reprodutiva de

Cenostigma macrophyllum Tul.(Fabaceae) no Parque Zoobotânico de Teresina, Piauí. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 1, 84-95.

<https://doi.org/10.24221/jeap.1.1.2016.993.84-95>

Aguiar, B.A.S., Sousa, A.N.S., Sousa, E.S., Sousa, G.M., 2023. Estudos fenológicos de leguminosas arbóreas das florestas tropicais secas do Nordeste Brasileiro nos últimos 10 anos. In: Seabra, G. (Ed.), *TERRA: objetivos do desenvolvimento sustentável no mundo pandêmico*. Editora Barlavento, pp. 252-265).

Aguiar, B.A.S.; Soares, E.S.S.; Santos, É.M.C.; Sousa, G.M., 2014. Guia Didático de Árvores do Parque Zoobotânico de Teresina (PI). 1ª ed. Teresina: EDUFPI/SEMAR, 1, 80p.

Alberton, B., Torres, R.D.S., Cancian, L.F., Borges, B.D., Almeida, J., Mariano, G.C., Morellato, L.P.C., 2017. Introducing digital cameras to monitor plant phenology in the tropics: applications for conservation. *Perspectives in Ecology and Conservation* 15, 82-90. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.004>.

Anderson, D.P., Nordheim, E.V., Moermond, T. C., Gone Bi, Z.B., Boesch, C., 2005. Factors Influencing Tree Phenology in Taï National Park, Côte d'Ivoire. *Biotropica* 37, 631-640. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-7429.2005.00080.x>.

Andrella, G.C., Souza, E.B.D., Sartori, Â.L.B., 2023. Revealing the influence of climatic variables on the distribution of legume dispersal traits in the Chaco. *Acta Botanica Brasilica* 37, e20230118.

Bartomeus, I., Ascher, J. S., Wagner, D., Danforth, B.N., Colla, S., Kornbluth, S., Winfree, R., 2011. Climate-associated phenological advances in bee pollinators and bee-pollinated plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, 20645-20649. <https://doi.org/10.1073/pnas.1115559108>.

Bencke, C.S.C., Morellato, L.P.C., 2002. Comparação de dois métodos de avaliação da fenologia de plantas, sua interpretação e representação. *Brazilian Journal of Botany* 25, 269-275. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042002000300003>.

Borges, L.A., Sobrinho, M.S., Lopes, A.V., 2009. Phenology, pollination and breeding system of the threatened tree *Caesalpinia echinata* Lam (Fabaceae) and a review of studies on the reproductive biology in the genus. *Flora* 204,

- 111-130.
<https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.01.003>.
- Borges, L.A., Souza, L.G.R., Guerra, M., Machado, I.C., Lewis, G.P., Lopes, A.V., 2012. Reproductive isolation between diploid and tetraploid cytotypes of *Libidibia ferrea* (= *Caesalpinia ferrea*) (Leguminosae): ecological and taxonomic implications. *Plant Systematics and Evolution* 298, 1371–1381. <https://doi.org/10.1007/s00606-012-0643-3>.
- Cann, A.J., 2002. *Maths from Scratch for Biologists*. Wiley & Sons, Chichester, England. 240p.
- Carvalho, F.S., Sartori, A.L.B., 2015. Reproductive phenology and seed dispersal syndromes of woody species in the Brazilian Chaco. *Journal of Vegetation Science* 26, 302–311. <https://doi.org/10.1111/jvs.12227>.
- Castro, N., Mata-Sucre, Y., Carvalho-Sobrinho, J., Marques, A., Queiroz, R.T., Souza, G., 2023. Genomic stability in *Cenostigma* Tul. (Caesalpinioideae, Fabaceae): causes and consequences. *Botanical Journal of the Linnean Society*, boad043. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boad043>.
- Chaves, M.M., Pereira, J.S., Maroco, J., Rodrigues, M.L., Ricardo, C.P.P., Osório, M.L., Pinheiro, C., 2002. How plants cope with water stress in the field? Photosynthesis and growth. *Annals of botany* 89, 907–916. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>.
- Corlett, R.T., 2016. The impacts of droughts in tropical forests. *Trends in plant science* 21, 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.02.003>
- Cunha, A.P.M.A.; Zeri, M.; Deusdará Leal, K.; Costa, L.; Cuartas, L.A.; Marengo, J.A.; Tomasella, J.; Vieira, R.M.; Barbosa, A.A.; Cunningham, C.; Garcia, J.V.C., Broedel, E., Alvalá, R., Ribeiro-Neto, G. 2019. Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere* 10, 642.
- Davis, C.C., Lyra, G.M., Park, D.S., Asprino, R., Maruyama, R., Torquato, D., Cook, B.I., Ellison, A.M., 2022. New directions in tropical phenology. *Trends in ecology & evolution* 37, 683–693.
- Dunnell, K.L., Travers, S.E., 2011. Shifts in the flowering phenology of the northern Great Plains: patterns over 100 years. *American Journal of Botany* 98, 935–945. <https://doi.org/10.3732/ajb.1000363>.
- Figueiredo, P.D., 2008. Fenologia e estratégias reprodutivas das espécies arbóreas em uma área marginal de cerrado, na transição para o semi-árido no nordeste do Maranhão, Brasil. *Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas* 2, 8–22.
- Fisher, N.I., 1995. *Statistical analysis of circular data*. Cambridge University Press.
- Fournier, L.A., 1974. Un método cuantitativo para La medición de características fenológicas en árboles. *Turrialba* 24, 422–423.
- Gaem, P. H., 2023. *Cenostigma* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB82870>. Acesso em: 12 set. 2023.
- Gaem, P.H. *Cenostigma* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB82870>. Acesso em: 27 mar. 2024.
- Gaem, P.H., 2021. A nomenclatural note in *Cenostigma* (Leguminosae, Caesalpinioideae). *Phytotaxa* 498, 150–151. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.498.2.9>.
- Gagnon, E., Bruneau, A., Hughes, C.E., Queiroz, L.P., Lewis, G.P., 2016. A new generic system for the pantropical *Caesalpinia* group (Leguminosae). *PhytoKeys* 71, 1–160.
- García-Cervigón, A.I., Camarero, J.J., Cueva, E., Espinosa, C. I., Escudero, A., 2020. Climate seasonality and tree growth strategies in a tropical dry forest. *Journal of Vegetation Science* 31, 266–280.
- Geissler, C., Davidson, A., Niesenbaum, R.A., 2023. The influence of climate warming on flowering phenology in relation to historical annual and seasonal temperatures and plant functional traits. *PeerJ* 11, e15188.
- Huang, C.Y., Durán, S.M., Hu, K.T., Li, H.J., Swenson, N.G., Enquist, B.J., 2021. Remotely sensed assessment of increasing chronic and episodic drought effects on a Costa Rican tropical dry forest. *Ecosphere* 12, e03824.
- Huang, J., Ji, M., Xie, Y., Wang, S., He, Y., Ran, J., 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. *Climate Dynamics* 46, 1131–1150.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2022. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment. In: Report. Pörtner, H.O.; Roberts, D.C.; Tignor, M.; Poloczanska, E.S.; Mintenbeck, K.; Alegría, A.; Craig, M.; Langsdorf, S.; Löschke, S.; Möller, V.; Okem, A.; Rama, B. (eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Ivanov, M.M.M., Oliveira, V.B.D., Leite, R.D.S., Vale, N.M.O.D., Karasinski, M.A., Fernandes,

- G.S.T., 2022. Seasonal Dynamics of the Phenology of Native Species from the Seasonally Dry Tropical Forest. *Floresta e Ambiente* 29, e20220032.
- Jongen, M., Hellmann, C., Unger, S., 2015. Species-specific adaptations explain resilience of herbaceous understorey to increased precipitation variability in a Mediterranean oak woodland. *Ecology and evolution* 5, 4246-4262. <https://doi.org/10.1002/ece3.1662>.
- Kovach, W. L., 2022. Oriana – Circular Statistics for Windows, ver. 4.2 Kovach Computing Services, Pentraeth, Wales, U.K.
- Lesica, P., Kittelson, P.M., 2010. Precipitation and temperature are associated with advanced flowering phenology in a semi-arid grassland. *Journal of Arid Environments* 74, 1013-1017. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.02.002>.
- Lima A.L.A., Rodal M.J.N., Castro C.C., Antonino, A.C.D., Melo, A.L., Gonçalves-Souza, T., Sá, E.V.B.S., 2021. Phenology of high- and low-density wood deciduous species responds differently to water supply in tropical semiarid regions. *Journal of Arid Environments* 193, 104594.
- Lima, A.L.A., Rodal, M.J.N., 2010. The phenology and wood density of plants growing in the semi-arid region of northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments* 73, 1363-1373. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.05.009>.
- Luna-Nieves, A.L., González, E.J., Cortés-Flores, J., Ibarra-Manríquez, G., Maldonado-Romo, A., Meave, J. A., 2022. Interplay of environmental cues and wood density in the vegetative and reproductive phenology of seasonally dry tropical forest trees. *Biotropica* 54, 500-514.
- Luna-Nieves, A.L., Meave, J.A., Morellato, L.P.C., Ibarra-Manríquez, G., 2017. Reproductive phenology of useful Seasonally Dry Tropical Forest trees: Guiding patterns for seed collection and plant propagation in nurseries. *Forest Ecology and Management* 393, 52-62.
- Marengo, J.A., Galdos, M.V., Challinor, A., Cunha, A. P., Marin, F. R., Vianna, M. D. S., Alvala, R.C.S., Alves, L.M., Moraes, O.L., Bender, F., 2022. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. *Climate Resilience and Sustainability* 1, e17.
- Marengo, J.A., Torres, R.R., Alves, L.M., 2017. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology* 129, 1189-1200.
- Medeiros, M., Wright, C.L., Lima, A.L.A., Silva, N.D.B., Souza, R., Silva, J.R.I., Souza, E., 2024. Divergent hydraulic strategies of two deciduous tree species to deal with drought in the Brazilian semi-arid region. *Trees* 1-14.
- Méndez-Toribio, M., Ibarra-Manríquez, G., Paz, H., Lebrija-Trejos, E., 2020. Atmospheric and soil drought risks combined shape community assembly of trees in a tropical dry forest. *Journal of Ecology* 108, 1347-1357. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13355>.
- Mendoza, I., Peres, C.A., Morellato, L.P.C., 2017. Continental-scale patterns and climatic drivers of fruiting phenology: A quantitative Neotropical review. *Global and Planetary Change* 148, 227-241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.12.001>.
- Miranda, D.J., Jorquera, M.J., Pugnaire, F.I., 2014. Phenological and reproductive responses of a semiarid shrub to pulsed watering. *Plant Ecology* 215, 769-777. <https://doi.org/10.1007/s11258-014-0354-7>.
- Miranda, L.D.A.P.D., Silva, B.T.S.D., Santos, J.P.A., Rodrigues, M.D.S., Trevisan, S.H., Menezes, I.S., Funch, L.S., 2023. Seasonality, dispersal modes, and optimal germination times modulate the fruiting of tropical tree species. *Rodriguésia* 74, e00652022. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202374028>.
- Morellato, L.P.C., Alberti, L.F., Hudson, I.L., 2010. Applications of circular statistics in plant phenology: a case studies approach. In: Hudson, I.L.; Keatley, M. (Eds.), *Phenological research: methods for environmental and climate change analysis*. Dordrecht, Springer, pp. 357-371. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3335-2_16.
- Morellato, L.P.C., Alberton, B., Alvarado, S.T., Borges, B., Buisson, E., Camargo, M.G.G., Cancian, L.F., Carstensen, D.W., Escobar, D.F.E., Leite, P.T.P., Mendoza, I., Rocha, N.M.W.B., Soares, N.C., Silva, T.S.F., Staggemeier, V.G., Streher, A.S., Vargas, B.C., Peres, C.A., 2016. Linking plant phenology to conservation biology. *Biological Conservation* 195, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.12.033>.
- Morellato, L.P.C., Talora, D.C., Takahasi, A., Bencke, C.C., Romera, E.C., Zipparro, W.B., 2000. Phenology of Atlantic Rain Forest trees: a comparative study. *Biotropica* 32, 811-823. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2000.tb00620.x>.
- Neves, S.P.S., Santos, M.G.M., Vitória, A.P., Rossatto, D.R., Miranda, L.D.A.P., Funch, L.S., 2022. The roles of functional traits in canopy maintenance along a savanna/seasonally dry

- tropical forest gradient in northeastern Brazil. *Flora* 292, 152090.
- Newstrom, L.E., Frankie, G.W., Baker, H.G., 1994. A new classification for plant phenology based on flowering patterns in lowland Tropical Rain Forest Trees at La Selva, Costa Rica. *Biotropica* 26, 141-159. <https://doi.org/10.2307/2388804>.
- Nogueira, F. C. B., Pacheco-Filho, A. J. S., Gallão, M. I., Bezerra, A. M. E., Medeiros-Filho, S., 2013. Fenologia de *Dalbergia cearensis* Ducke (Fabaceae) em um fragmento de floresta estacional, no semiárido do nordeste, Brasil. *Revista Árvore* 37, 657-667. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400009>.
- Oliveira, C.C., Zandavalli, R.B., Lima, A.L.A., Rodal, M. J. N., 2015. Functional groups of woody species in semi-arid regions at low latitudes. *Austral Ecology* 40, 40-49. <https://doi.org/10.1111/aec.12165>.
- PBMC. (2014). Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. In: Ambrizzi, T., Araujo, M. (Eds.). COPPE. Base científica das mudanças climáticas. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464p.
- Pedroni, F., Sanchez, M., Santos, L.A.M., 2002. Fenologia da copaíba (*Copaifera langsdorffii* Desf. – Leguminosae, Caesalpinioideae) em uma floresta semidecídua no sudeste do Brasil. *Brazilian Journal of Botany* 25, 183-194.
- Pei, N.C., Kress, W.J., Chen, B.F., Erickson, D.L., Wong, K.M., Zhang, J.L., Zhang, D.X., 2015. Phylogenetic and climatic constraints drive flowering phenological patterns in a subtropical nature reserve. *Journal of Plant Ecology* 8, 187-196.
- Queiroz, L.P., 2009. Leguminosas da Caatinga. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 467 p.
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J.A., George, S.S., Stoffel, M., 2022. Tropical and subtropical dendrochronology: Approaches, applications, and prospects. *Ecological Indicators* 144, 109506.
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., Toomey, M., 2013. Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology* 169, 156-173.
- Ripple, W.J., Wolf, C., Gregg, J.W., Rockström, J., Newsome, T.M., Law, B.E., Marques, L., Lenton, T.M., Xu, C., Huq, S., Simons, L., King, S.D.A., 2023. The 2023 state of the climate report: Entering uncharted territory. *BioScience* 73, 841-850.
- Schleip, C., Rutishauser, T., Luterbacher, J., Menzel, A., 2008. Time series modeling and central European temperature impact assessment of phenological records over the last 250 years. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 113, 1-13.
- Seghieri, J., Vescovo, A., Padel, K., Soubie, R., Arjounin, M., Boulain, N., Rosnay, P., Galle, S., Gosset, M., Mouctar, A.H., Peugeot C., Timouk, F., 2009. Relationships between climate, soil moisture and phenology of the woody cover in two sites located along the West African latitudinal gradient. *Journal of Hydrology* 375, 78–89.
- Silva, J.J., Duarte, E.F., Kiill, L.H.P., Gomes, R.A., Dantas, B.F., Pelacani, C.R., Funch, L.S., 2023a. Phenological dynamics of four populations of *Handroanthus spongiosus* in seasonally dry tropical forest in Brazil. *Flora*, 152371.
- Silva, J.L.S., Barros, M.F., Rito, K.F., Cruz-Neto, O., Arnan, X., Tabarelli, M., Leal, I.R., Albuquerque, U.P., Lopes, A. V., 2023b. Reproductive functional organization of woody plant assemblages along regeneration in a Caatinga dry forest. *Forest Ecology and Management* 533, 120852.
- Singh, L.J., Dey, B.C., Mitra, P.K., Sharma, G.P., Kushwaha, C.P., 2024. Diversity of reproductive phenology of trees in the tropical evergreen forest of Andaman and Nicobar Islands, India. *Tropical Ecology* 1-11.
- Soares, N. S. 2001. Leis Básicas do Município de Teresina. Teresina: O autor.
- Souza, C.R.D., Santos, A.B.M., Maia, V.A., Paula, G.G.P.D., Fagundes, N.C.A., Coelho, P.A., Santos, P.F., Morel, J.D., Garcia1, P.O., Santos, R.M.D., 2021. Seasonally dry tropical forest temporal patterns are marked by floristic stability and structural changes. *Cerne* 27, e-102355.
- Souza, J.T., Ferraz, E.M.N., Albuquerque, U.P., Araújo, E.L., 2014. Does proximity to a mature forest contribute to the seed rain and recovery of an abandoned agriculture area in a semiarid climate?. *Plant Biology* 16, 748-756.
- Souza, T.C.T., Nascimento, V.T., 2018. Aspectos reprodutivos de *Cenostigma macrophyllum* Tull. (Fabaceae-Caesalpinioideae) em uma área

- de Cerrado em regeneração no Oeste da Bahia. *Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente* 7, 3-12.
- Stevenson, P.R., Castellanos, M.C., Cortés, A.L., 2008. Flowering patterns in a seasonal tropical lowland forest in western Amazonia. *Biotropica* 40, 559-567.
- Stuble, K.L., Bennion, L.D., Kuebbing, S.E., 2021. Plant phenological responses to experimental warming-A synthesis. *Global Change Biology* 27, 4110-4124.
- Vicente-Serrano, S.M., Gouveia, C., Camarero, J.J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J.I., Azorín-Molina, C., Pasho, E., Lorenzo-Lacruz, J., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., Sanchez-Lorenzo, A., 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, 52-57.
- Vieira, R.M.D., Tomasella, J., Barbosa, A.A., Martins, M.A., Rodriguez, D.A., Rezende, F. S., Carriello, F., Santana, M.D., 2021. Desertification risk assessment in Northeast Brazil: Current trends and future scenarios. *Land Degradation & Development* 32, 224-240.
- Volder, A., Briske, D. D., Tjoelker, M.G., 2013. Climate warming and precipitation redistribution modify tree-grass interactions and tree species establishment in a warm-temperate savanna. *Global Change Biology* 19, 843-857.
- Warwick, M.C., Lewis, G.P., 2009. A revision of *Cenostigma* (Leguminosae – Caesalpinioideae – Caesalpinieae), a genus endemic to Brazil. *Kew Bull* 64, 135-146.
- Wright, C.L., Lima, A.L., Souza, E.S., West, J.B., Wilcox, B.P., 2021. Plant functional types broadly describe water use strategies in the Caatinga, a seasonally dry tropical forest in northeast Brazil. *Ecology and Evolution* 11, 11808-11825.
- Zeppel, M.J.B., Wilks, J.V., Lewis, J.D., 2014. Impacts of extreme precipitation and seasonal changes in precipitation on plants. *Biogeosciences* 11, 3083-3093.