

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO -PRPG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE - PPGBio

JULIO CÉSAR DA SILVA

**ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E FENOLÓGICAS EM GRAMÍNEAS
(POACEAE) DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO EM RESPOSTA A MUDANÇA
CLIMÁTICA**

RECIFE
2024

JULIO CÉSAR DA SILVA

**ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E FENOLÓGICAS EM GRAMÍNEAS
(POACEAE) DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO EM RESPOSTA A MUDANÇA
CLIMÁTICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, da Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Biodiversidade.

Orientador: Jefferson Rodrigues Maciel

RECIFE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A466a da Silva, Julio César
Alterações morfológicas e fenológicas em gramíneas (Poaceae) do Semiárido brasileiro em resposta a mudança climática / Julio César da Silva. - 2024.
51 f. : il.
- Orientador: Jefferson Rodrigues Maciel.
Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Recife, 2024.
1. Mudanças climáticas. 2. gramíneas. 3. semiárido. 4. morfologia. 5. tempo de floração. I. Maciel, Jefferson Rodrigues, orient. II. Título

CDD 333.95

JULIO CÉSAR DA SILVA

**ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E FENOLÓGICAS EM GRAMÍNEAS
(POACEAE) DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO EM RESPOSTA A MUDANÇA
CLIMÁTICA**

Dissertação defendida e aprovada em: ____/____/____

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jefferson Rodrigues Maciel (Orientador)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Prof. Dra. Thais Elias Almeida (Titular)

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Profa. Dra. Maria Teresa Buril (Titular)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Profa. Dr. Jone Clebson Ribeiro Mendes (Suplente)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

"A natureza é o palco da nossa existência. Ao preservá-la, cultivamos não apenas um ambiente saudável, mas a base da nossa própria humanidade." - E. O. Wilson

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e à minha espiritualidade por me proporcionarem a força e a vitória que tenho hoje na minha vida. Se cheguei até aqui, é tudo graças a eles.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), pelas melhores oportunidades acadêmicas desde a minha graduação até a pós-graduação. Ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade (PPGBIO) por fornecer apoio, infraestrutura e conhecimento para a minha formação profissional e acadêmica. Ao Laboratório de Sistemática Integrativa (LASI) por conceder um espaço para o estudo, pesquisa e colaboração.

A CAPES, pela concessão da bolsa, que foi tão importante para o desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao meu orientador Jefferson Maciel, pelas conversas construtivas, conhecimentos riquíssimos, ideias e visões de pesquisa sempre relevantes e instigadores, soluções de problemas, conselhos necessários e amizade. Tudo que aprendi com o senhor vai ser muito importante para a minha carreira acadêmica e profissional daqui pra frente.

À professora Carmen Zickel que foi a primeira pessoa na minha graduação a acreditar na minha capacidade, enquanto tinha recebido diversos “não”. Lembro a primeira vez que marquei uma reunião e mostrei uma ideia de pesquisa que queria muito realizar e no primeiro encontro ela já me explicou a metodologia e emprestou todos os materiais necessários para usar em campo. Depois consegui três bolsas de iniciação científica e só tenho a agradecer pelo conhecimento, oportunidade e amizade.

Ao professor Watson Junior, pelo aprendizado durante a pós-graduação, as suas críticas e sugestões foram muito importantes para o meu crescimento acadêmico.

À professora Teresa Buri, pela oportunidade de acompanhar o meu estágio docência durante o mestrado, pelas sugestões para a minha pesquisa e por aceitar o convite de compor a banca examinadora.

À professora Sarah Souza, pelas sugestões relevantes para a minha dissertação após a qualificação.

À professora Thais Almeida e ao professor Jone Mendes, pelas sugestões construtivas e por aceitarem o convite de compor a banca examinadora.

Aos herbários Professor Vasconcelos Sobrinho (PEUFR) da UFRPE, UFP - Geraldo Mariz da UFPE e ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA) por disponibilizarem a visita

e a observação dos espécimes. À curadora Maria Rita do PEUFR por sempre se mostrar disposta a ajudar desde a minha iniciação científica. À curadora Rita de Cássia do IPA e à curadora Marlene Barbosa do UFP pelo auxílio durante as visitas ao herbário.

A secretária do PPGBIO Cynara Leleu pela disposição em ajudar quando precisei em todas as etapas do mestrado e pela agilidade e dedicação ao programa.

Aos meus pais, Paulo e Sandra, se hoje estou aqui foi graças a dedicação e amor que recebi de vocês na minha vida, obrigado por tudo e que essa minha nova conquista seja de vocês também.

Ao meu companheiro Carlos que me acompanha nesta jornada há 7 anos desde o início da minha graduação até agora, obrigado pela força nos momentos tristes, pelos conselhos, quando achava que tudo estava perdido e pela amizade verdadeira que existe entre nós.

Aos meus familiares de sangue e espiritual que me apoiaram e se alegraram pelas minhas conquistas como a minha irmã Reila, minha cunhada Yohana, meus filhos de alma Heitor e Yasmin.

Aos meus amigos e colegas acadêmicos como Conceição, Vitória, Irapuan, Renata, Ariade, Angélica, Joe, Victor, Melissa, Tainá, Fernando, Jesse, Natan, Tianisa e Thaysa pelo apoio, alegria, risadas, descontração, colaboração, troca de conhecimento e por sempre passarem essa energia boa e positiva na minha vida.

Agradeço também a mim, aos meus esforços, dedicação, superação e fé em mim mesmo.

LISTA DE FIGURA

Figura 1. Variation in mean temperature, maximum temperature, minimum temperature annual mean precipitation, and Pacific Decadal Oscillation-PDO	35
Figura 2. Linear regressions of morphological features versus year of collection.....	36
Figura 1. Regressão linear do tempo de florescimento em relação à temperatura média anual, temperatura média mínima anual e média máxima anual de duas espécies de gramíneas.....	49
Figura 2. Regressão linear do tempo de floração em relação à longitude e latitude de três espécies de gramíneas.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relationship between the size of plant organs and geographic and climatic variables. The blue color indicates a positive relationship, while the red color indicates a negative relationship.....	37
---	----

SUMÁRIO

Resumo	11
Abstract	12
Fundamentação teórica	13
Referências bibliográficas	18
Manuscrito I	23
Abstract.....	25
Introduction.....	26
Materials and Methods.....	27
Results.....	28
Discussion.....	29
Conclusion.....	31
References.....	31
Manuscrito II	38
Resumo.....	40
Introdução.....	41
Material e Métodos.....	42
Resultados.....	43
Discussão.....	43
Conclusão.....	45
Referências bibliográficas.....	45
Considerações finais	50

RESUMO

Nas últimas décadas, o aquecimento global tem elevado a temperatura da superfície terrestre e dos oceanos em uma média de 0,2°C por década. Entre 2006-2015, a temperatura média global aumentou 1°C em comparação com 1850-1900, indicando uma preocupante tendência de aquecimento global. Os riscos associados à mudança climática são mais acentuados com um aumento de 1,5°C na temperatura global. As consequências abrangem áreas como saúde humana, segurança alimentar, fornecimento de água e biodiversidade. Essas implicações se tornam ainda mais evidentes quando consideramos as mudanças climáticas antropogênicas, que têm sido associadas à redução nos órgãos vegetativos e alterações no tempo de floração de plantas. Nas regiões semiáridas, consideradas as mais vulneráveis em relação às mudanças climáticas, a aridez pode intensificar-se a partir do aquecimento global, impactando diretamente a adaptação das gramíneas. Estas, por sua vez, são notáveis por sua capacidade de enfrentar condições estressantes, como déficit hídrico e secas. O aumento da aridez nessas áreas pode proporcionar uma maior expansão e invasão das gramíneas. No entanto, as respostas morfológicas específicas das gramíneas às mudanças climáticas antropogênicas ainda não foram estudadas. Diante disso, algumas hipóteses foram formuladas: (1) as gramíneas do Semiárido brasileiro estão ajustando seus órgãos vegetativos e reprodutivos para se adaptarem às mudanças climáticas; (2) a precipitação desempenha um papel central nas alterações morfológicas das gramíneas anuais na região semiárida; (3) a mudança climática influencia o tempo de floração das gramíneas anuais do semiárido. Para investigar estas hipóteses, foram selecionadas 4 espécies gramíneas anuais do Semiárido brasileiro (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* e *Paspalum scutatum*) e analisados 591 espécimes depositados nos herbários e acervos digitais. A temperatura média do Semiárido Brasileiro aumentou 1,89°C entre 1960 a 2021. Três espécies apresentaram redução na altura da planta ao longo do tempo de observação, enquanto *Enteropogon mollis* não demonstrou nenhuma mudança direcional contínua. A maioria das espécies também respondeu às variáveis climáticas e geográficas, principalmente nos acréscimos dos órgãos reprodutivos à medida que a temperatura aumenta. Esta estratégia plástica pode estar atribuída às gramíneas de ambientes semiáridos. Na análise fenológica, a temperatura desempenhou um papel crucial no tempo de floração de algumas gramíneas. *Enteropogon mollis* e *Paspalum fimbriatum* retardaram o seu florescimento em temperaturas mais elevadas. As mudanças morfológicas e fenológicas nas gramíneas, que desempenham um papel crucial como espécies forrageiras, têm o potencial de desencadear um significativo

efeito cascata. Isso pode impactar a disponibilidade de recursos para os animais herbívoros, resultando em um desequilíbrio ecológico substancial.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, gramíneas, semiárido, morfologia, tempo de floração.

ABSTRACT

In recent decades, global warming has raised the temperature of the Earth's surface and oceans by an average of 0.2°C per decade. Between 2006-2015, the global average temperature increased by 1°C compared to 1850-1900, indicating a concerning trend of global warming. Risks associated with climate change are more pronounced with a 1.5°C increase in global temperature. Consequences encompass areas such as human health, food security, water supply, and biodiversity. Anthropogenic climate changes have been linked to a reduction in plant vegetative organs and alterations in flowering times. In semi-arid regions, considered the most vulnerable to climate change, aridity may intensify due to global warming. Grasses in these environments are adapted to stressful conditions like water deficit and droughts. Increased aridity may lead to greater expansion and invasion of grasses in these areas. However, specific morphological responses of grasses to anthropogenic climate changes have not been studied. Consequently, several hypotheses were formulated: (1) grasses in the Brazilian Semi-Arid are adjusting their vegetative and reproductive organs to adapt to climate changes; (2) precipitation plays a central role in morphological changes of annual grasses in the semi-arid region; (3) climate change influences the flowering time of annual grasses in the semi-arid region. To test these hypotheses, 591 specimens of annual grasses from the Brazilian Semi-Arid of four species (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum*, and *Paspalum scutatum*) were selected from herbaria and digital collections. The average temperature in the Brazilian Semi-Arid increased by 1.89°C between 1960 and 2021. Three species showed a reduction in plant height over the years, while *Enteropogon mollis* exhibited no continuous directional change. Most species also responded to climate and geographic variables, particularly by increasing reproductive organs as temperature rises, indicating a plastic strategy adapted to semi-arid environments. In phenological analysis, temperature played a crucial role in the flowering time of some grasses. *Enteropogon mollis* and *Paspalum fimbriatum* delayed flowering in higher temperatures. Morphological and phenological changes in grasses, crucial as forage species, have the potential to trigger a significant cascading effect. This may impact the availability of resources for herbivores, resulting in substantial ecological imbalance.

Keywords: Climate change, grasses, semi-arid, morphology, flowering time.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A partir da Revolução Industrial em 1750, a concentração de gases de efeito estufa atingiu níveis elevados (Bettioli *et al.*, 2017). A concentração média global do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera subiu 40%, o de metano elevou 150% e a de óxido nitroso aumentou 20% (Bettioli *et al.*, 2017). O acúmulo desses gases em níveis alarmantes, resultante das mudanças climáticas de origem antrópica, está ocasionando sérios problemas para o planeta e suas formas de vida (IPCC, 2014).

Nas últimas décadas, a temperatura da superfície terrestre e dos oceanos tem sido mais quente do que em qualquer década anterior a 1850, fenômeno este denominado de “aquecimento global”, considerado um dos principais efeitos das mudanças climáticas (Bettioli *et al.*, 2017). Atualmente, o aquecimento global antrópico teve uma tendência a aumentar 0,2°C por década, devido às emissões de gases de efeito estufa passadas e atuais (Masson *et al.*, 2018). A temperatura média global analisada na superfície da terra para a década de 2006-2015 foi de 1°C mais alta que a média global do período de 1850-1900 (Masson *et al.*, 2018).

A temperatura global já experimentou um aumento de 3°C mais quentes do que os dias atuais (Kukla *et al.*, 2002) e esta elevação provocada pelos ciclos interglaciais do Pleistoceno contribuiu para a reorganização de comunidades biológicas, paisagens e biomas, além das alterações na distribuição das espécies (Kohfeld & Harrison, 2000). A biota global atual é bem adaptada às variações dos níveis pleistocênicos de CO₂ atmosférico, temperatura e precipitação. A plasticidade fenotípica e a capacidade de dispersão das espécies resultaram na sobrevivência em meio às flutuações ambientais pleistocênicas (Silva *et al.*, 2018). Dessa forma, é esperado que o aquecimento acima dos níveis pleistocênicos, além da rápida elevação de temperatura em curto período (em comparação àquelas dos últimos 1,8 milhões de anos), poderá provocar uma grande extinção de espécies (Webb *et al.*, 1987, Alroy, 2001).

Os riscos associados às mudanças antropogênicas do clima são maiores no cenário de aumento de 1,5°C da temperatura global, sendo que os riscos dependem do ritmo do aquecimento, localidade geográfica, vulnerabilidade e escolhas das opções de adaptações e mitigações (Zhongming *et al.*, 2022). As consequências da rápida elevação da temperatura são amplas, como o impacto na saúde humana (aumento das doenças infecciosas), nos meios de subsistência, principalmente pela pesca, na segurança alimentar, no abastecimento hídrico e na biodiversidade (Savary *et al.*, 2011, IPCC, 2014). Os principais impactos atuais da

mudança climática antrópica na biodiversidade global consistem nas mudanças de distribuição geográfica das espécies, aumento da competição e riscos de bioinvasão, alteração no tempo dos eventos sazonais, variações morfológicas do corpo biológico, incompatibilidade espaço-temporal na cadeia alimentar e extinção de espécies (Zhongming *et al.*, 2022). Segundo o Terceiro Relatório de Avaliação (IPCC, 2002), foram observadas mudanças na fenologia, morfologia, fisiologia, comportamento e distribuição de 80% das espécies em um total de 388 espécies de pássaros, 47 espécies de invertebrados, 29 espécies de anfíbios e répteis, 10 espécies de mamíferos e 59 espécies de plantas. Os efeitos das mudanças climáticas nas plantas são: redução ou aumento na altura, na largura foliar e no tempo de floração (IPCC, 2002; BRASIL, 2007; Guerin *et al.*, 2012; Leger *et al.*, 2013; Visser, 2022).

A diminuição no tamanho dos indivíduos pode estar ligada às reduções dos recursos disponíveis devido às mudanças climáticas, tal como respostas fisiológicas ao aumento da temperatura (Gardner *et al.*, 2011), enquanto as espécies que aumentam de tamanho podem indicar uma estratégia generalista (Sheridan & Bickford, 2011). A plasticidade pode ter um papel fundamental nas mudanças morfológicas relacionadas aos fatores abióticos (Laland *et al.*, 2015). Espécies que não apresentam respostas plásticas em ambiente instável podem estar associadas à estratégia de canalização, produzindo fenótipos invariantes (West-Eberhard, 2003). Estudos relacionados a uma expansão contemporânea do paradigma evolutivo denominada de Síntese Evolutiva Estendida (EES), entende que não só a seleção natural, deriva genética, fluxo gênico e mutação são processos evolutivos, mas a cobertura de viés do desenvolvimento, plasticidade, herança inclusiva e construção de nichos são incluídas também como causa e não apenas uma consequência da evolução (Wray *et al.*, 2014). A contribuição da plasticidade para a evolução pode ser observada pelo acomodamento fenotípico e genético (Moczek *et al.*, 2011). O acomodamento fenotípico provoca ajustes mútuos de partes de um organismo durante o seu desenvolvimento sem envolver mutações genéticas, enquanto o acomodamento genético pode fornecer um mecanismo de adaptação rápida a novas condições ambientais, à medida que esses ambientes induzem e selecionam simultaneamente fenótipos alternativos (West-Eberhard, 2003). Leger (2013) levantou questões em uma visão mais tradicional da biologia evolutiva sobre a influência da plasticidade e alterações genéticas nas mudanças morfológicas das plantas analisadas em herbário. Nessa perspectiva, a plasticidade explicaria apenas mudanças de curto prazo, enquanto as alterações genéticas estariam mais relacionadas às mudanças direcionais contínuas de longo prazo. Entretanto, as respostas plásticas podem ser um ponto de partida

para mudanças evolutivas. Isso ocorre porque o acomodamento fenotípico poderia promover o acomodamento genético se os fenótipos induzidos pelo ambiente forem posteriormente estabilizados e ajustados ao longo das gerações pela seleção de variação genética existente (Lande, 2009; Laland et al., 2015).

A fenologia é o estudo dos estágios recorrentes das plantas e animais, impulsionado por forças ambientais (Liang, 2019). A temperatura influencia fortemente nas mudanças fenológicas e é uma das consequências mais visíveis das mudanças climáticas (Visser, 2022). Entretanto, a temperatura não é a única variável que afeta a fenologia. Em regiões tropicais, a frequência e intensidade de chuva, juntamente com o fotoperíodo e umidade podem influenciar nas mudanças fenológicas das espécies (Flynn, 2018; Sakai & Kitajima, 2019). Os padrões de chuva nas regiões tropicais são fortemente influenciados pela Oscilação Sul (El Niño/La Niña), que se caracteriza por fases alternadas de temperatura quente e fria na superfície do oceano Pacífico equatorial (World Meteorological Organization, 2021). Essas anomalias ocorrem a cada 2-7 anos e têm impacto nas comunidades de plantas tropicais, levando a eventos como floração em massa induzida pelo El Niño ou frutificação afetada pela seca (Detto et al., 2018; Sheldon, 2019). As plantas possuem uma rápida capacidade de resposta fenológica em comparação aos animais. Com isso, dentro da cadeia alimentar, os animais herbívoros, nectarívoros e frugívoros não conseguem acompanhar estas mudanças, gerando uma incompatibilidade fenológica (Zhongming et al., 2022). Esta incompatibilidade resulta num efeito cascata sobre os grupos funcionais dentro dos ecossistemas, afetando o crescimento, reprodução e sobrevivência desses indivíduos, com possíveis repercussões para populações e ecossistemas (Zhongming et al., 2022).

O desabrochar das cerejeiras (*Prunus jamasakura*) que marca a chegada da primavera no Japão e desempenha um papel importante na cultura japonesa é um dos exemplos mais conhecidos de mudanças fenológicas temporais, apresentando ao longo de 1200 anos de observação uma aceleração nas datas de plena floração a partir da revolução industrial (Primack, 2009).

No Brasil, uma das regiões que podem ser mais prejudicadas pela mudança climática é o semiárido, com secas severas e diminuição da disponibilidade dos recursos hídricos (IPCC, 2007). No semiárido brasileiro existem registros de secas desde o século XVI no Brasil colonial (Lima & Magalhães, 2019), mas somente em meados de 1990 foram registradas maiores sequências de anos secos em comparação aos anos anteriores, sendo de 2012 a 2017 o período com mais secas na história do semiárido brasileiro (Marchezini et al., 2017). As principais causas das secas recentes no Nordeste brasileiro foram relacionadas ao

aquecimento anormal do Oceano Atlântico Norte Tropical que ocasionou um posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao norte, desfavorecendo a precipitação na região do semiárido (Rodrigues & McPhaden, 2014). Pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveram modelos regionais para os cenários futuros do aquecimento global, que indica que a temperatura no semiárido pode aumentar de 1,5°C a 5°C até o final do século XXI, ocasionando uma intensa aridez na região, além do aumento de eventos extremos como chuvas torrenciais e enchentes (Marengo, 2006).

No Semiárido brasileiro, o fator climático é o principal modulador da vegetação de Caatinga, na qual a irregularidade interanual das chuvas favorece as plantas mais adaptadas às condições ambientais adversas (Corrêa et al., 2019). A vegetação herbácea da Caatinga é formada por um estrato efêmero, composto por espécies terófitas e geófitas (Prado, 2003, Queiroz, 2009). Entretanto, a forma de vida predominante é terófito, de ciclo anual e adaptada ao clima semiárido, que floresce apenas no período chuvoso (Pereira et al., 1989, Oliveira et al., 2013).

A variabilidade climática pode modificar temporariamente a estrutura e composição florística do estrato herbáceo da Caatinga (Reis et al., 2006). Essas espécies herbáceas desempenham um papel importante na manutenção dos estratos lenhosos da Caatinga, pois fornecem proteção e sombra ao solo, o que é importante para a germinação desse estrato (Reis et al., 2006, Vieira & Scariot, 2006). Asteraceae, Malvaceae e Poaceae são as famílias mais representativas dos estratos herbáceos da Caatinga, mas Poaceae possui o maior número de espécies registradas nesta vegetação, principalmente em áreas abertas antropizadas (Oliveira et al., 2013). As duas subfamílias de Poaceae mais representativas na região do semiárido brasileiro são Panicoideae e Chloridoideae, ambas formadas, na maioria, por gramíneas C4. Panicoideae se distribui nas regiões tropicais e subtropicais e Chloridoideae se distribui principalmente nas regiões áridas e semiáridas (Judd et al., 2009; Clark, 2009).

As gramíneas são particularmente sensíveis à mudança de temperatura e precipitação, pois muitas têm raízes curtas, ciclo de vida anual e respostas amplas e rápidas às variações climáticas (Knapp & Smith, 2001). Nesse sentido, as espécies que conseguem adaptar o seu crescimento e reprodução rapidamente, podem acompanhar as mudanças climáticas e ambientais, com uma maior probabilidade de sobreviver no futuro (Anderson, *et al.*, 2012).

Dentre essas observações, surgiram algumas perguntas direcionadoras aqui apresentadas: (1) Os efeitos das mudanças climáticas têm afetado a morfologia das gramíneas anuais do Semiárido brasileiro? (2) Quais variáveis climáticas influenciam as mudanças morfológicas e a fenologia reprodutiva das gramíneas do semiárido? (3) Como o tempo de

floração das gramíneas é afetado em um cenário de mudanças climáticas? Diante disso, algumas hipóteses foram levantadas: (1) As gramíneas do Semiárido brasileiro vem modificando seus órgãos vegetativos e reprodutivos como consequência das mudanças climáticas; (2) a precipitação é o principal condicionador das mudanças morfológicas nas gramíneas anuais do semiárido; (3) a mudança do clima altera o tempo de floração das gramíneas anuais do semiárido. Para testar essas hipóteses, foram selecionadas quatro espécies do Semiárido brasileiro como modelo biológico (*Enteropogon mollis* (Nees) Clayton., *Panicum trichoides* Swart, *Paspalum fimbriatum* Kunth e *Paspalum scutatum* Nees ex Trin). *Enteropogon mollis* e *Paspalum fimbriatum* possuem uma distribuição disjunta centro-sul-americana, onde sua ocorrência no Brasil se restringe ao semiárido (Maciel, 2009; Maciel, 2020). *Panicum trichoides* tem uma distribuição ampla no continente americano. Na Caatinga ocorre em vários habitats, mas prefere ambientes planos (Andrade *et al.*, 2007), enquanto, *Paspalum scutatum* é classificada como uma espécie endêmica dos Domínios Semiárido brasileiro, localizada em solos arenosos e de ciclo anual curto (Maciel, 2009).

A pesquisa tem como objetivo geral identificar as variações morfológicas e fenológicas de quatro espécies (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* e *Paspalum scutatum*) de gramíneas anuais do Semiárido brasileiro em resposta às mudanças climáticas de causalidade antrópica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alroy, J. 2001. A multispecies overkill simulation of the end-Pleistocene megafaunal mass extinction. **Science**, 292, n. 5523, p. 1893-1896.
- Anderson, J. T., Inouye, D. W., McKinney, A. M., Colautti, R. I., & Mitchell-Olds, T. 2012. Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advancing flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 279, n. 1743, p. 3843-3852.
- Andrade, J. R., Santos, J. M. F. F., Lima, E. N., Lopes, C. G. R., Silva, K. A., Araújo, E. L. 2007. Estudo populacional de *Panicum trichoides* Swart. (Poaceae) em uma área de caatinga em Caruaru, Pernambuco. **Revista Brasileira de Biociências**. 5. 858-860.
- Bettiol, W., et al. 2017. Aquecimento global e problemas fitossanitários. **Embrapa Meio Ambiente-Livro científico (ALICE)**.

BRASIL. 2007. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Inter-relações entre biodiversidade e mudanças climáticas. Brasília: **MMA**. 206 p.

CLARK, L. G. 2009. Subfamilial classification of the Poaceae, with emphasis on the Bambusoideae. In: MOURA, C. W. N.; SILVA, T. R. S.; GIULIETTI-HARLEY, A. M., SANTOS, F.A.R. (eds.) Botânica brasileira: futuro e compromissos. **Congresso Nacional de Botânica**, 60, Feira de Santana. Anais... Feira de Santana, p. 218-222.

Corrêa, A. C. d. B., et al. 2019. The semi-arid domain of the Northeast of Brazil. **The Physical Geography of Brazil**, Springer: 119-150.

Detto, M., Wright, S.J., Calderón, O. and Muller-Landau, H.C. 2018. Resource acquisition and reproductive strategies of tropical forest in response to the El Niño–Southern Oscillation. **Nature Communications** 9, 913.

Flynn, D.F.B. and Wolkovich, E.M. 2018. Temperature and photoperiod drive spring phenology across all species in a temperate forest community. **New Phytologist** 219(4), 1353-1362.

Gardner, J. L., et al. 2011. Declining body size: a third universal response to warming? **Trends in ecology & evolution**, 26, n. 6, p. 285-291.

Guerin, G. R., et al. 2012. Leaf morphology shift linked to climate change. **Biology letters**, 8, n. 5, p. 882-886.

IPCC, C. W. T. Climate change 2007: synthesis report. **IPCC Geneva, Switzerland**. 2007.

IPCC, I. **Documento técnico V del IPCC**. 2002.

IPCC, I. Alterações Climáticas 2014. Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade-Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Quinto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Alterações Climáticas. **Lisboa: Instituto Português do Mar e da Atmosfera, IP**.

Judd, W. S. et al. 2009. **Sistemática vegetal: um enfoque filogenético**. Porto Alegre: Artmed. 612p.

Laland, Kevin N. et al. 2015. The extended evolutionary synthesis: its structure, assumptions and predictions. **Proceedings of the royal society B: biological sciences**, v. 282, n. 1813.

Lande R. 2009. Adaptation to an extraordinary environment by evolution of phenotypic plasticity and genetic assimilation. **J. Evol. Biol.** 22, 1435– 1446.

Leger, E. A. 2013. Annual plants change in size over a century of observations. **Global Change Biology**, 19, n. 7, p. 2229-2239.

Liang, L. 2019. Phenology. **Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**.

Lima, J. R. d. and A. R. Magalhães. 2019. Secas no Nordeste: registros históricos das catástrofes econômicas e humanas do século 16 ao século 21. **Parcerias Estratégicas**, 23, n. 46, p. 191-212.

Maciel, J.R., Valls, J.F.M. 2020. *Enteropogon* in Flora do Brasil 2020. **Jardim Botânico do Rio de Janeiro**. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB20374.ab>

Maciel, J. R., et al. 2009. *Paspalum* L.(Poaceae: Panicoideae: Paniceae) no estado de Pernambuco, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, 23, n. 4, p. 1145-1161.

Masson, V. D., et al. 2018. Global warming of 1.5 C. **An IPCC Special Report on the impacts of global warming of**, 1, n. 5.

Kohfeld, K. E. and S. P. Harrison. 2000. How well can we simulate past climates? Evaluating the models using global palaeoenvironmental datasets. **Quaternary Science Reviews**, 19, n. 1-5, p. 321-346.

Knapp, Alan K.; Smith, Melinda D. 2001. Variation among biomes in temporal dynamics of aboveground primary production. **Science**, v. 291, n. 5503, p. 481-484.

Kukla, G. J., et al. 2002. Last interglacial climates. **Quaternary Research**, 58, n. 1, p. 2-13.

Marchezini, V., et al. 2017. Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action. **RiMa Editora, São Carlos**.

Marengo, J. A., et al. 2011. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, 1, p. 385-422.

Moczek AP et al. 2011. The role of developmental plasticity in evolutionary innovation. **Proc.**

R. Soc. B 278, 2705– 2713.

Oliveira, D. G. d., et al. 2013. Herbáceas da Caatinga: composição florística, fitossociologia e estratégias de sobrevivência em uma comunidade vegetal. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v. 8, n. 4.

Pereira, R. d. A., et al. 1989. Estudos fenológicos de algumas espécies lenhosas e herbáceas da caatinga. **Embrapa Caprinos e Ovinos-Artigo em periódico indexado (ALICE)**.

Prado, D. E. 2003. As caatingas da América do Sul. **Ecologia e conservação da Caatinga**, 2, p. 3-74.

Primack, R.B., Higuchi, H. and Miller-Rushing, A.J. 2009. The impact of climate change on cherry trees and other species in Japan. **Biological Conservation** 142(9),1943-1949.

Reis, A. M. S., et al. 2006. Variações interanuais na composição florística e estrutura das populações de uma comunidade herbácea da caatinga, Pernambuco, Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, 29, n. 3, p. 497-508.

Rodrigues, R. R. and M. J. McPhaden. 2014. Why did the 2011–2012 La Niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast? **Geophysical Research Letters**, 41, n. 3, p. 1012-1018.

Sakai, S. e Kitajima, K. 2019. Tropical phenology: Recent advances and perspectives. **Ecological Research**, 34(1), 50-54.

Sheldon, K.S. 2019. Climate Change in the Tropics: Ecological and Evolutionary Responses at Low Latitudes. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics** 50, 303–33.

Savary, S., et al. 2011. International agricultural research tackling the effects of global and climate changes on plant diseases in the developing world. **Plant Disease**, 95, n. 10, p. 1204-1216.

Sheridan, J. A. and D. Bickford. 2011. Shrinking body size as an ecological response to climate change. **Nature Climate Change**, 1, n. 8, p. 401-406.

Silva, M. A. F. d., et al. 2018. Impacto de mudanças climáticas sobre a distribuição geográfica potencial de *Ilex paraguariensis*. **Rodriguésia**, 69, p. 2069-2079.

Vieira, D. L. and A. Scariot. 2006. Principles of natural regeneration of tropical dry forests for

restoration. **Restoration ecology**, 14, n. 1, p. 11-20.

Visser, M. 2022. Phenology: Climate change is shifting the rhythm of nature. *Frontiers* 2022: Noise, Blazes and Mismatches: Emerging Issues of Environmental Concern, **United Nations Environment Programme (UNEP)**:41-58.

Webb, T., Bartlein, P. J., Kutzbach, J. E. 1987. Climatic change in eastern North America during the past 18,000 years; comparisons of pollen data with model results. **North America and Adjacent Oceans During the Last Deglaciation**, W. F. Ruddiman, H. E. Wright, Jr.

West-Eberhard, M. J. 2003. Developmental plasticity and evolution. **Oxford University Press**.

World Meteorological Organization. 2021. El Niño/La Niña. <https://wmo.int/topics/el-nino-la-nina> Acessado em 05 de fevereiro de 2024.

Wray GA, Hoekstra HE, Futuyma DJ, Lenski RE, Mackay TFC, Schluter D, Strassman JE. 2014. Does evolutionary theory need a rethink? No, all is well. **Nature** 514, 161–164.

Zhongming, Z., et al. 2022. AR6 Synthesis Report: **Climate Change 2022**.

[illegible]

Article submitted to the journal *Biology Letters*, Qualis A1.

Morphological shifts in semiarid grasses as a response to climate change

Julio César da Silva¹, Jefferson Rodrigues Maciel^{1,2}

1. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

2. Jardim Botânico do Recife, Prefeitura da Cidade do Recife, Recife, Pernambuco, Brazil

Abstract

It is a known fact that plants respond to climate change with shifts in height, leaf width and flowering time. However, there is a gap in knowledge about the response to climate change of grass species found in semiarid ecosystems that still persists. Here, we test two hypotheses: 1. grass species are experiencing shifts in their vegetative and reproductive organs as a response to climate change; and 2. precipitation is the main driver of morphological shifts. We gathered morphological data on 591 specimens of four annual grasses (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* and *Paspalum scutatum*) collected between 1859 and 2022; and climate data starting in 1960 on monthly mean precipitation; mean, maximum and minimum monthly temperature; and Pacific Decadal Oscillation (PDO) from 94 conventional and automatic meteorological stations of the Brazilian semiarid. For the climatic analysis of temperature and precipitation, specimens collected before 1960 were discarded. We then performed simple linear regressions to evaluate the relationship between morphological, climatic and collection year (as a sample unit of recent climate change) variables. Our results found morphological shifts in semiarid grasses as a response to climate change. Recent climate change explained reductions in the plant height of three species, leaf length of two species, inflorescence size of two species, and spikelet size of one species. Our study provides new empirical clues of drivers for evolution and adaptation to climate change in semiarid ecosystems and demonstrates the effects of climate change in morphological shifts of grass species in the Brazilian semiarid.

Keywords: Climate change, Global warming, herbaria, Morphology, Poaceae, semiarid.

1. Introduction

The temperatures of oceans and the earth's surface have been continuously on the rise since 1850 as an effect of global warming caused by climate change [1]. Plants respond to climate change with shifts in height, leaf width and flowering time [2-5]. For example, specimens of *Dodonaea viscosa* (L.) Jacq. exhibited a 2 mm narrowing in leaves between 1880 and 2000, concurrent with a temperature increase of 1.2°C in Australia [4]. In another case, Leger [5] observed that several annual plants showed height reduction in the last 100 years in the United States while, at the same time, temperatures experienced an increase. For several authors, these shifts can be related to adaptive plasticity and genetic accommodation [3,6]. Despite the recent accumulation of proof indicating shifts in plant organs as a response to climate change, the debate on whether every region or every plant group is affected in the same way is still a matter of interest to research. A gap in this knowledge is related to the response of grass species from semiarid ecosystems.

The Brazilian semiarid emerges as one most profoundly affected area globally by climate change, evidenced by decreased precipitation and severe droughts, leading to a significant reduction of hydric resources in the region [7]. Temperatures could increase 1.5°C to 5°C until the end of the 21st century in the Brazilian semiarid according to climate change projections [8]. In the region, the typical irregular interannual rainfall favors plants adapted to rapid reproductive cycles [9]. Thus, therophytes predominate in the herbaceous strata due to their capacity for flowering and fruiting during the short and irregular rainy season [10-11]. The rich herbaceous strata of the region offer protection and shade to the soil which is essential to help tree seeds germinate [12-13].

In the herbaceous vegetation of the Brazilian semiarid, Poaceae is the richest plant family, especially in open and anthropized areas [11]. Species of Poaceae demonstrate a striking sensibility to fluctuations in temperature and precipitation. This is partly due to superficial radicular systems and short annual life cycles that improve the ability of species of this family to react to climatic variations [14]. Therefore, Poaceae species can match their growth and reproductive patterns with the adaptation to environmental and climatic changes, hence becoming one of the most adapted groups for climate change [15]. However, whether Poaceae species have undergone morphological shifts over a century of the climate change time scale remains controversial.

To explore the gaps presented here, in this work we tested the following hypothesis: 1. Grass species are experiencing shifts in their vegetative and reproductive organs as a response to climate change; 2. Precipitation is the main driver of morphological shifts in

semiarid Poaceae species. We selected four annual grass species as biological models: *Enteropogon mollis* (Nees) Clayton., *Panicum trichoides* Swart, *Paspalum fimbriatum* Kunth, and *Paspalum scutatum* Nees ex Trin.

2. Material and methods

(a) Study area

The Brazilian semiarid has a tropical climate marked by high temperatures (mean annual 27°C) and annual precipitation inferior to 800 mm, relative humidity around 65%, litholic soils (with low depth and predominantly crystalline substrate) and irregularly distributed in long periods of droughts. In almost all regions the rainy season is in summer, between December and April, except in the west, where rains can start in November [19]. Currently, the criterion adopted for delimitation of the Northeast Semi-Arid region is Annual average rainfall equal to or less than 800 mm, Thornthwaite Aridity Index equal to or less than 0.50, and daily percentage of water deficit equal to or greater than 60%, considering all days of the year. In the Brazilian semiarid, the caatinga is the main type of vegetation, where more than 12.000 species have been recorded. Fabaceae, Poaceae, Euphorbiaceae, Bromeliaceae and Cactaceae dominate in number of species and in landscape formation. This vegetation is characterized by a spiny seasonal forest surrounded by a herbaceous stratum that can vary in density according to climate and soil conservation [20].

(b) Morphological data

We collected the data of 591 specimens of four annual grasses (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* and *Paspalum scutatum*) in the Brazilian herbaria (IPA, PEUFR, UFP) and the digital collections of Specieslink, Re flora and the Smithsonian National Museum of Natural History. *Enteropogon mollis* and *Paspalum fimbriatum* occur in other semiarid regions of South America, but records show their occurrence predominantly in the Brazilian semiarid [16, 17]. *Panicum trichoides* is widely distributed in North, Central, and South America [18]. *Paspalum scutatum* is an endemic species from the Brazilian semiarid [16]. These species were selected as biological models due to these requirements: a high number of samples in the semiarid region, all specimens with roots and inflorescence and diversity in distribution type. A table was built with the coordinates of the specimens to check in *QGIS 3.0* software if the collection site is within the limits of the Brazilian semiarid region. The samples included the timeframe between 1859 and 2022. We recorded collection date, coordinates, plant height (measured from the base of the culm to the tip of the inflorescence), leaf length (as only the measure of the leaf blade), leaf width (measured in the

median portion of the leaf blade), inflorescence length (measured from the first raceme to the tip of the last raceme) and the spikelet length (from the base of the spikelet at the apex). All measures were recorded manually with the aid of a ruler and graph paper for herbarium specimens, and with ImageJ software for digital exsiccatae.

(c) Climatic data

We collected data on monthly mean precipitation; mean, maximum and minimum monthly temperature, and the Pacific Decadal Oscillation (PDO) starting in 1960, from 94 conventional and automatic meteorological stations of the Brazilian semiarid in the database of the Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP-INMET) and the Joint Institute for Atmospheric and Ocean Studies (JISAO). We used the collection date and location of the exsiccatae as parameters to select the meteorological stations to work on. We also used the elevation described in the exsiccatae to select the meteorological stations to reduce the elevational effect of climate variation in the data.

(d) Data analysis

We performed simple linear regressions to evaluate the relationship between morphological variation and longitude, latitude, monthly precipitation, temperature (monthly mean, minimum and maximum), PDO, collection year — as a sample unit of climate change. Variable year, latitude and longitude were projected in the entire period of the sample collection (1859-2020) while climatic comparisons were limited to the meteorological available data (1960-2020). We calculated the p-value adjusted by the Holm method as a statistical coefficient to identify the significant responses. We performed all analysis in the statistical environment R using the 'vegan' and 'ggplot2' packages.

3. Results

Temperatures increased significantly in the Brazilian semiarid between 1960 and 2021 (Figure 1). The mean temperature increased by 1.89°C ($P < 0.0001$), the minimum temperature was 1.54°C higher ($P < 0.0001$) and the maximum temperature increased 2.05°C ($P < 0.0001$). Annual precipitation did not change significantly ($P = 0.148$), and PDO also did not show any significant change between 1854 and 2021 ($P = 0.838$). We also confirm field observations of some geographical patterns in precipitation and temperature in the Brazilian semiarid. The precipitation decreases and the temperature increases northward in the Brazilian semiarid (Table 1) expressed by a negative relationship between precipitation and latitude ($P < 0.001$) and a positive relationship between mean temperature and latitude ($P < 0.0001$). Thus, habitats occupied by all species analyzed are drier and hotter northward.

Our results indicate a negative response of morphological variables throughout the years (Figure 2). *Paspalum scutatum* underwent a reduction in plant height (± 8.71 cm, $P < 0.05$), leaf length (± 2.64 cm, $P < 0.01$) and spikelet length (± 0.014 cm, $P < 0.05$). We recorded a reduction in the height (± 33.54 cm, $P < 0.001$), leaf length (± 4.15 cm, $P < 0.05$) and inflorescence length (± 3.10 cm, $P < 0.05$) of *P. fimbriatum*. In *Panicum trichoides*, we also observed a reduction in plant size (± 16.22 cm, $P < 0.01$) and inflorescences length (± 4.26 cm, $P < 0.001$). *Enteropogon mollis* was the only species without response in the time observed. We found no significant variation of leaf width over time.

Geographical and climatic variables also explain morphological character variation in the species analyzed (Table 1). In *P. scutatum*, leaf length increased eastward, influenced by the increase in the monthly maximum temperature and in the intensity of PDO (during El Niño periods). On the other hand, an increase in mean precipitation may explain leaf length reduction in *P. scutatum*. Latitude explained the variation in the inflorescence size of *Paspalum fimbriatum* and *Panicum trichoides*. For both, inflorescence increases northward in the analyzed samples. Latitude also explains positive shifts in the spikelet length of *E. mollis* and *P. trichoides*. In the same way, spikelets of *E. mollis* and *P. trichoides* increase in size as mean and maximum temperatures increase. Changes in minimum temperature only explain shifts of spikelets in *E. mollis*. Plant height did not show any significant relationship with geographical nor climatic variables.

4. Discussion

Here, we demonstrated that grass species of the Brazilian semiarid are undergoing a reduction in the size of their vegetative and reproductive organs since the 19th century, especially in the last 62 years, when the annual mean temperature increased 1.89°C in the region. Thus, we detected morphological shifts in semiarid grasses as a response to climate change. Only *E. mollis* exhibited no significant morphological shifts in the period covered by our study. However, we also detected a regional variation of morphological attributes in the Brazilian semiarid in which local variation in precipitation and temperature explained shifts in leaf size, inflorescence and spikelet. These regional variations confirm the ability of grasses to invest in a strategy to improve the size of inflorescences and spikelets in places with low precipitation and high temperatures.

We found that temperature acted as the main climatic variable to explain morphological shifts in the analyzed grass species. Consequently, we rejected the role of precipitation as expected in our second hypothesis. This revalidates the importance of

temperature reported in other studies [4,5]. There is evidence that plants and animals are decreasing in size as a consequence of climate change through time and this negative relationship is explained by an increase in temperatures [21-22]. In an experimental study with the grass *Austrodanthonia caespitosa* (Gaudich.) H.P. Linder, a reduction of seedlings as a response to an increase in CO₂ and temperatures was observed [23]. However, possible influences of temperature increases caused by climate change on morphological shifts of plant organs in grasses had never been explored before our study.

In our study, time as a sampling unit of climate change explained a correlation between reductions in plant height of three annual species (*P. scutatum*, *P. fimbriatum* and *P. trichoides*), the leaf length of two species (*P. scutatum* and *P. fimbriatum*), the inflorescence size of two species (*P. fimbriatum* and *P. trichoides*), and the spikelet size of one species (*P. scutatum*). Leger (2013) observed responses in time in the morphological changes of annual plants in *Collinsia parviflora* Lindl, *Cryptantha pterocarya* (Torr.) Greene, *Eriastrum signatum* D. Gowen, *Gilia inconspicua* (Sm.) Sweet and *Microsteris gracilis* (Hook.) Greene decreased in size, and *Mentzelia albicaulis* (Hook.) Torr. & A. Gray increased in height [5]. These reductions in size can be connected to physiological responses to rises in temperature caused by climate change [24]. Size reduction can also be an outcome of other effects of climate change such as soil degradation, desertification, and an increase in wildfires and grazing [4, 5, 25].

Several authors discussed the causality of these morphological shifts over time as plasticity responses to environmental changes or genetic changes [5, 26]. Short-term studies detailed that small plants could adapt better to drought conditions due to low transpiration when compared to taller plants [27-29]. Authors agree with the persistent difficulties in determining the main mechanism of these morphological alterations because of the lack of knowledge of specific genes that operate on the size of organisms combined with the idea that plasticity cannot be sustained for a long time [24, 30]. However, new concepts on the contribution of phenotypic plasticity to macroevolution are increasingly found in the literature, such as the role of genetic accommodation in determining the plasticity of development of a population resulting in greater frequencies of genes that codify adaptive features for the next generations [31-33].

Our results bring new evidence of geographical patterns of morphological variation in the Brazilian semiarid based on significant relationships between geographical and climatic variables and morphological shifts in the analyzed species. This is a pattern also found by Guerin et al. (2012). Environmental stress factors that occur in isolated or short-term events

promote plastic responses that differ from long-term continuous changes [6]. These changes can be related to the concept of phenotypic plasticity that can be immediate, temporary and reversible [33]. Such a strategy would also be associated with the C4 photosynthetic pathway of the selected plants that allow them to adapt to dry and hot habitats [34]. These factors could also explain the fact that the only association in morphological shifts with prolonged droughts provoked by El Niño was found in *P. scutatum*, the endemic species in our study [35]. All this evidence gives us clues concerning evolution and diversification drivers in the Brazilian semiarid once they likely act as environmental filters of plasticity or adaptive responses.

5. Conclusions

We demonstrated the correlation between the effects of climate change on the morphological changes of grass species in the Brazilian semi-arid region. Our results provide new empirical clues for evolution and adaptation drivers to climate change in semiarid ecosystems. However, we also contribute to furthering the understanding of the general impact of climate change and new perspectives in the research field. The reduction in grass size can create a cascade effect in all trophic chains since grasses have a central role as forage, soil protection and helping the seed bank of semiarid ecosystems. Thus, future studies exploring the impact of climate change on the ecosystem will be needed to solve open questions in this field. We need to understand better how genetics influence long-term morphological changes. These studies will help to identify the regional vulnerabilities of biodiversity from the comparisons of morphological and phenological changes under several climatic conditions.

Acknowledgments

We are grateful to the CAPES for the availability of the master's scholarship, to the Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade (PPGBIO) of the Universidade Federal de Pernambuco (UFRPE), and the Laboratório de Sistemática Integrativa (LASI) of UFRPE.

References

1. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR. 2022 Global Warming of 1.5° C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5° C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. Cambridge University Press. (doi.org/10.1017/9781009157940)

2. BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. 2007 Inter-relações entre biodiversidade e mudanças climáticas. Brasília: MMA, 206 p. See <https://livroaberto.ibict.br/handle/1/975>

3. Visser M. 2022 Phenology: Climate change is shifting the rhythm of nature. *Frontiers* 2022: Noise, Blazes and Mismatches: Emerging Issues of Environmental Concern, United Nations Environment Programme (UNEP) **4**, 41-58. See <https://research.rug.nl/en/publications/phenology-climate-change-is-shifting-the-rhythm-of-nature>

4. Guerin GR, Wen H, Lowe AJ. 2012 Leaf morphology shift linked to climate change. *Biol. Lett.* **8**, 882-886. (doi.org/10.1098/rsbl.2012.0458)

5. Leger EA. 2013 Annual plants change in size over a century of observations. *Global Change Biology* **19**, 2229-2239. (doi.org/10.1111/gcb.12208)

6. Ehrenreich IM, Pfennig DW. 2016 Genetic assimilation: a review of its potential proximate causes and evolutionary consequences. *Ann. Bot.* **117**, 769–779.

7. Bernstein L, Bosch P, Canziani O, Chen Z, Christ R, Riahi, K. 2008 Climate change 2007: synthesis report. Geneva: IPCC. See http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html

8. Marengo JA, Alves LM, Beserra EA, Lacerda, FF. 2011. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas, 1, 385-422. See https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/932/1/recursos_hidricos_em_regioes_semiaridas.pdf

9. Corrêa, ACB, Azevêdo CTB, Lira DR, Mutzenberg DS, Cavalcanti, LCS. 2019 The semi-arid domain of the Northeast of Brazil. In: Salgado A, Santos L, Paisani J. (eds) The Physical Geography of Brazil: Environment, Vegetation and Landscape. *Springer, Cham*. 119-150. (doi.org/10.1007/978-3-030-04333-9_7)

10. Amorim IL, Sampaio EVSB, Araujo EL. 2009 Phenology of woody species in the caatinga of Seridó, RN, Brazil. *Rev. Árvore* **33**, 491-499.

11. Oliveira DG, Prata AP, Ferreira RA. 2013 Herbáceas da Caatinga: composição florística, fitossociologia e estratégias de sobrevivência em uma comunidade vegetal. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* **8**, 623-633. (doi.org/10.5039/agraria.v8i4a2682)
12. Reis AMS, Araújo EL, Ferraz EMN, Moura AN. 2006 Variações interanuais na composição florística e estrutura das populações de uma comunidade herbácea da caatinga, Pernambuco, Brasil. *Brazilian Journal of Botany* **29**, 497-508. (doi.org/10.1590/S0100-84042006000300017)
13. Vieira DL, Scariot A. 2006 Principles of natural regeneration of tropical dry forests for restoration. *Restoration ecology* **14**, 11-20. (doi.org/10.1111/j.1526-100X.2006.00100.x)
14. Knapp AK, Smith MD. 2001 Variation among biomes in temporal dynamics of above ground primary production. *Science* **291**, 481–484. (doi: 10.1126/science.291.5503.481)
15. Guerin GR, Biffin E, Lowe AJ. 2013 Spatial modelling of species turnover identifies climate ecotones, climate change tipping points and vulnerable taxonomic groups. *Ecography* **36**, 1086-1096
16. Maciel JR, Oliveira RCD, Alves M. 2009 Paspalum L.(Poaceae: Panicoideae: Paniceae) no estado de Pernambuco, Brasil. *Acta Botanica Brasilica* **23**, 1145-1161. (doi.org/10.1590/S0102-33062009000400024)
17. Maciel JR, Valls JFM. 2020 *Enteropogon* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. See <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB20374.ab>
18. Andrade JR, Santos JMFF, Lima EN, Lopes CGR, Silva KA, Araújo EL. 2007 Estudo populacional de *Panicum trichoides* Swart. (Poaceae) em uma área de caatinga em Caruaru, Pernambuco. *Revista Brasileira de Biociências* **5**, 858-860. See <https://seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/115780>
19. Moura MSB, Galvinctio JD, Brito, LDL, Souza LD, Sá IDS, Silva, TGF. 2007 Clima e água de chuva no Semi-Árido. Petrolina: Embrapa Semi-Árido. 37-59. See <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/159649>
20. Loiola MIB, Roque, ADA., Oliveira AD. 2012 Caatinga: Vegetação do semiárido brasileiro. : *Ecologi@ - Revista Online da Sociedade Portuguesa de Ecologia* **4**, 14-19.

21. Barber VA, Juday GP, Finney BP. 2000 Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress. *Nature* **405**, 668–673. (doi.org/10.1038/35015049)
22. Sheridan JA, Bickford D. 2011 Shrinking body size as an ecological response to climate change. *Nat. Clim. Change* **1** 401–406. (doi.org/10.1038/nclimate1259)
23. Hovenden MJ, Wills KE, Chaplin RE, Vander Schoor JK, Williams AL, Osanai YUI, Newton PC. 2008 Warming and elevated CO₂ affect the relationship between seed mass, germinability and seedling growth in *Austrodanthonia caespitosa*, a dominant Australian grass. *Global Change Biology*, **14**, 1633–1641. (doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01597.x)
24. Gardner JL, Peters A, Kearney MR, Joseph L, Heinsohn R. 2011 Declining body size: a third universal response to warming? *Trends in ecology & evolution*, **26**, 285–291. (doi.org/10.1016/j.tree.2011.03.005)
25. Tavares VC, Arruda IRP, Silva DG. 2019 Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. *Geosul*, **34**, 385–405. (doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p385)
26. Schlichting CD. 1986 The evolution of phenotypic plasticity in plants. *Annual Review of Ecology and Systematics* **17**, 667–693. (doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.003315)
27. Angadi S, Entz M. 2002 Water relations of standard height and dwarf sunflower cultivars. *Crop Science*, **42**, 152–159. (doi.org/10.2135/cropsci2002.1520)
28. Hendrix SD, Trapp EJ. 1992 Population demography of *Pastinaca sativa* (Apiaceae): effects of seed mass on emergence, survival, and recruitment. *American Journal of Botany*, **79**, 365–375. (doi.org/10.1002/j.1537-2197.1992.tb14563.x)
29. Casper BB. 1996 Demographic consequences of drought in the herbaceous perennial *Cryptantha flava*: effects of density, associations with shrubs, and plant size. *Oecologia*, **106**, 144–152. (doi.org/10.1007/BF00328593)
30. Tilman D, Lehman CL, Bristow CE. 1998 Diversity-Stability relationships: statistical inevitability or ecological consequence? *The American Naturalist*, **151**, 277–282. See <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/286118>

31. West-Eberhard MJ. 2003 Developmental Plasticity and Evolution. *Oxford University Press*.
32. West-Eberhard MJ. 2005 Phenotypic accommodation: adaptive innovation due to developmental plasticity. *Journal of Experimental Biology* **304B**, 610-618. (doi.org/10.1002/jez.b.21071)
33. Simon MN. 2018 Acomodação fenotípica e acomodação genética: evidências e questões não resolvidas em macroevolução. *Revista da Biologia* **6**, 1-5. (doi.org/10.7594/revbio.06a.01)
34. Braga FM, Ferreira EA, Cabral CM, Freitas IC, Maciel JC, Freitas MSS, Sampaio RA. 2021 Review: Growth of C3 and C4 plants in response to different CO2 concentrations. *Research, Society and Development*. **10** (doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16701)
35. Marengo JA, Nunes LH, Souza CRG, *et al.* 2017 A globally deployable strategy for co-development of adaptation preferences to sea-level rise: the public participation case of Santos, Brazil. *Natural Hazards* **88**, 39-53 (doi.org/10.1007/s11069-017-2855-x)

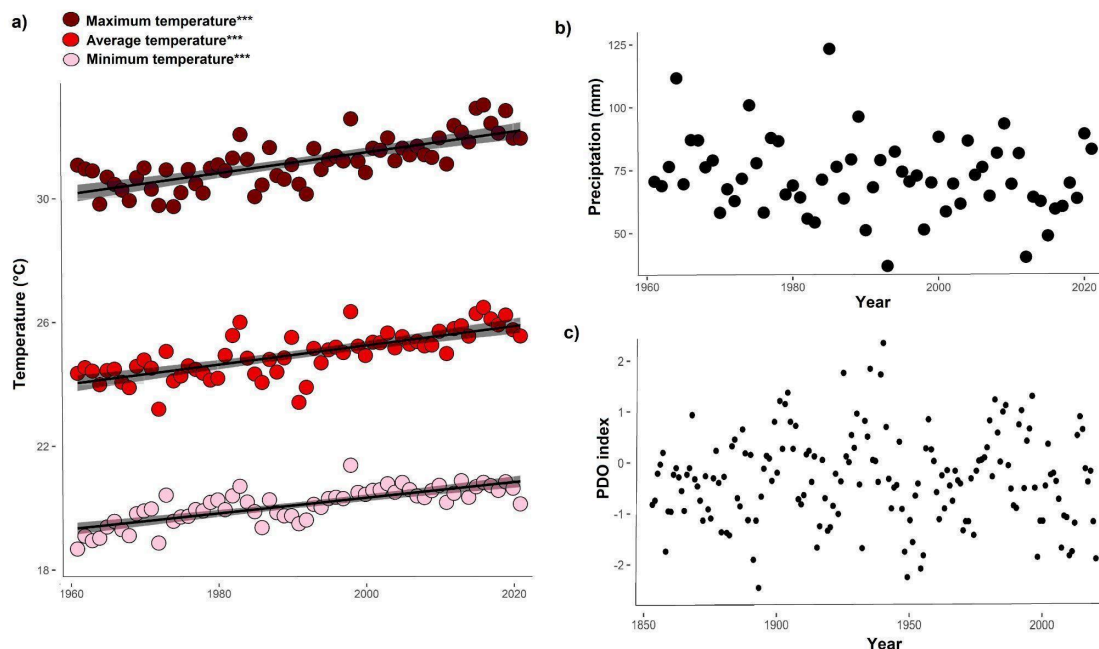


Figure 1. Variation in mean temperature, maximum temperature, minimum temperature annual mean precipitation and Pacific Decadal Oscillation-PDO. (A) Tendency of maximum, mean and minimum temperature over 61 years of observation in Brazilian semiarid; (B) Tendency of precipitation over 61 years of observation in Brazilian semiarid; (C) - Index of

PDO over 167 years of observation in the Brazilian semiarid. Significance level: *** $P < 0.0001$. Data based on the closest meteorological stations to occurrence sites recorded for *Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* and *Paspalum scutatum* in the Brazilian semiarid.

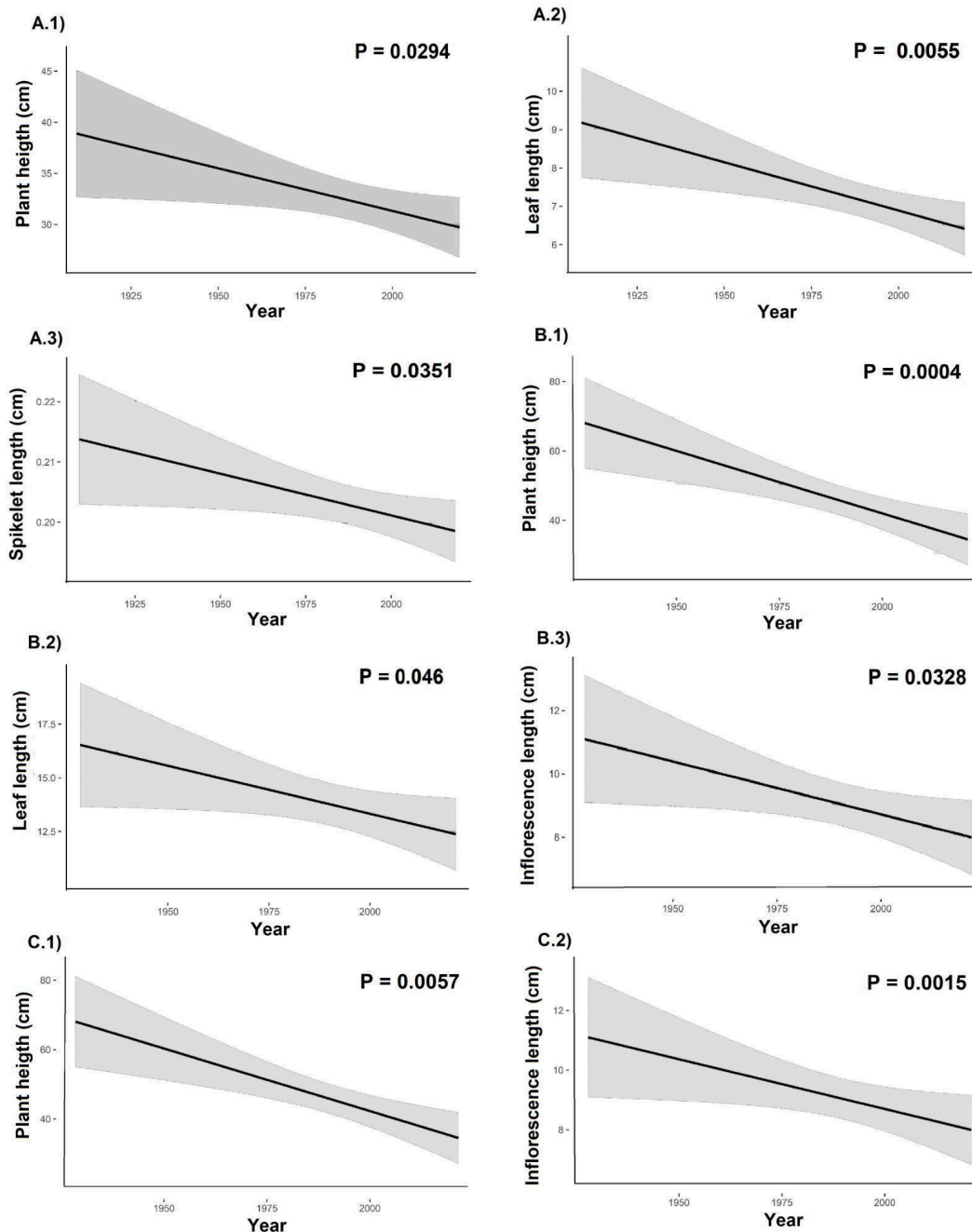
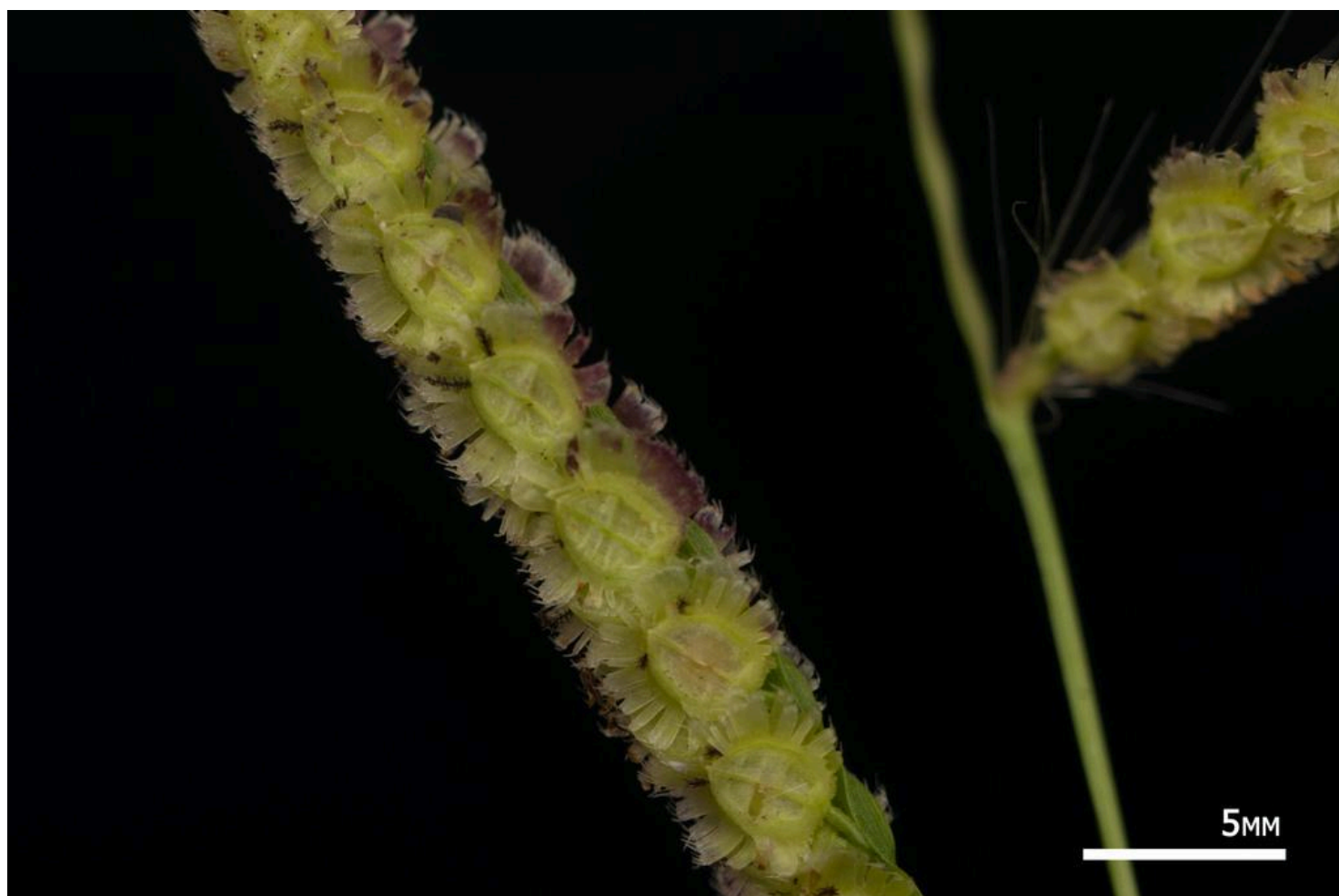


Figure 2. Linear regressions of morphological features versus year of collection (data from herbarium samples). (A) *Paspalum scutatum*: 1. plant height, 2. leaf length, 3. spikelet length; (B) *Paspalum fimbriatum*: 1. plant height, 2. leaf length, 3. spikelet length; (C) *Panicum trichoides* 1. plant height, 2. inflorescence size.

Table 1. Relationship between the size of plant organs and geographic and climatic variables. The blue color indicates a positive relationship, while the red color indicates a negative relationship.

	<i>P. scutatum</i>	<i>P. fimbriatum</i>	<i>P. trichoides</i>	<i>E. mollis</i>
A) Comprimento foliar				
Longitude	0.1662 P = 0.00671	-	-	-
Precipitação média	-0.0072 P = 0.00474	-	-	-
Temperatura máxima	0.1645 P = 0.0428	-	-	-
PDO	0.06338 P = 0.024216	-	-	-
B) Comprimento da inflorescência				
Latitude	-	0.1404 P = 0.00602	0.1409 P = 0.0172	-
C) Comprimento da espiguetta				
Latitude	-	0.0025 P = 0.0449	0.0020 P = 0.00182	0.0163 P = 0.015
Temperatura média	-	-	0.0028 P = 0.0034	0.0202 P = 0.00641
Temperatura máxima	-	-	0.0022 P = 0.0099	0.0140 P = 0.0264
Temperatura mínima	-	-	-	0.0236 P = 0.00211



**MUDANÇA NO CLIMA ALTERA O TEMPO DE FLORAÇÃO DAS GRAMÍNEAS
ANUAIS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Artigo a ser submetido para a revista
Journal of Arid Environments, Qualis
A2.

Mudança no clima altera o tempo de floração das gramíneas anuais do semiárido brasileiro

Julio César da Silva¹, Jefferson Rodrigues Maciel²

1. Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

2. Jardim Botânico do Recife, Prefeitura da Cidade do Recife, Recife, Pernambuco, Brazil

Resumo

Nas duas primeiras décadas do século XXI, houve um aumento de 1°C na temperatura média global em comparação com o período de 1850-1900. Esse aumento térmico emerge como um dos principais impulsionadores das alterações fenológicas na biodiversidade, sendo uma decorrência das mudanças climáticas. Gramíneas (Poaceae) são fundamentais para a biodiversidade e produtividade global, por oferecerem serviços ecossistêmicos vitais. Devido à sua sensibilidade às variações de temperatura e padrões de precipitação, alterações climáticas podem impactar as reservas de carbono no solo e a segurança alimentar associada às gramíneas. Neste contexto, essa pesquisa busca responder a perguntas cruciais sobre a influência das mudanças climáticas no tempo de floração das gramíneas na região semiárida, explorando as variáveis climáticas que afetam sua fenologia reprodutiva. Foram coletados dados de 591 espécimes de gramíneas anuais (*Enteropogon mollis*, *Panicum trichoides*, *Paspalum fimbriatum* e *Paspalum scutatum*) coletadas na região do Semiárido brasileiro e depositados em herbários brasileiros e acervos digitais. Os dados climáticos, como precipitação, temperatura e Oscilação Decadal do Pacífico, foram obtidos para análise. A data de coleta foi convertida em dia do ano e relacionada às variáveis meteorológicas, geográficas e temporais. Utilizou-se o modelo de regressão linear simples no software *R studio*. *Enteropogon mollis* e *Paspalum fimbriatum* responderam com atraso no seu florescimento em temperaturas mais elevadas. O fenômeno do El Niño foi significativamente relacionado ao atraso no tempo de floração de *E. mollis*. As variáveis geográficas demonstraram uma forte influência sobre as gramíneas anuais, que pode estar associada a sazonalidade e outros fatores não climáticos, como fotoperíodo, uso e ocupação do solo, estado nutricional da planta e características físicas do solo. Entender como as gramíneas respondem ao clima durante o florescimento é fundamental para aprimorar as previsões sobre o desempenho futuro das plantas diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, gramíneas, fenologia, tempo de floração.

Introdução

Nas primeiras duas décadas do século XXI, a temperatura da superfície global foi 1°C mais alta que no período de 1850-1900 (Masson-Delmotte, 2021). O aumento da temperatura é um dos principais condicionadores de mudanças fenológicas na biodiversidade como uma consequência das mudanças climáticas, observada pelo menos nas regiões temperadas e polares do mundo (Visser, 2022.) As espécies vegetais têm a capacidade de modificar seu tempo de floração em resposta ao clima (Munson & Sher, 2015).

As gramíneas (Poaceae) são plantas muito importantes para a biodiversidade global e produtividade pelo fornecimento de serviços ecossistêmicos e sustentabilidade agrícola (Sala & Paruelo, 1997). Por serem sensíveis ao aumento da temperatura e padrões alterados de precipitação, qualquer mudança no clima pode alterar as reservas de carbono armazenados no solo e a segurança alimentar (Rosenzweig & Parry, 1994; Parton *et al.*, 1995; Knapp & Smith, 2001), o que leva a um desequilíbrio ecológico causado pelo efeito cascata (Scheffer *et al.*, 1995). A alteração fenológica das espécies vegetais em relação à mudança do clima pode demonstrar o grau da sua resposta plástica ou adaptativa (DeWitt *et al.*, 1998).

Nos estudos de Munson & Long (2017) sobre a fenologia reprodutiva de gramíneas do Oeste dos Estados Unidos, o autor identificou através do levantamento de dados de espécimes de herbário que essas espécies atrasam ou adiantam o seu período de floração em relação ao aumento da temperatura, dependendo do grupo funcional que elas ocupam. As gramíneas anuais são mais sensíveis à mudança do clima por exibirem um ciclo de vida curta, o que as tornam mais suscetíveis aos fatores exógenos de indução floral, como o fotoperíodo, precipitação e temperatura (Vaz *et al.*, 2008; Calinger *et al.*, 2013; Manson & Long, 2017). Authier *et al.* (2023) demonstraram nos estudos fenológicos de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. que a temperatura experimentada pela geração anterior influencia na resposta do tempo de floração da próxima geração, um tipo de “memória ambiental” (epigenética) transmitido para a sua progênie.

A análise de longo prazo das mudanças fenológicas das gramíneas pode ser observada nos registros de herbário (Lang *et al.*, 2019). Os espécimes fornecem evidências do local e tempo específico do período de floração, visto que as gramíneas dificilmente são coletadas sem a inflorescência (Primack *et al.*, 2004; Park & Schmartz, 2015; Manson & Long, 2017). Primack *et al.* (2004) foram os primeiros autores a relacionar os dados meteorológicos com o tempo de floração, utilizando os dados de espécimes de herbário num período de 100 anos, conseguiram identificar a relação da floração anterior com o aumento da temperatura de primavera.

O Semiárido brasileiro é uma das regiões mais vulneráveis do mundo aos efeitos das mudanças climáticas, o que pode ocasionar o aumento da aridez e redução na disponibilidade hídrica (Bernstein, 2007). As gramíneas desta região, geralmente de ciclo de vida curto, florescem no período chuvoso e são adaptadas à instabilidade de precipitação pluvial (Pereira *et al.*, 1989). Nisso, algumas perguntas foram formuladas nesta pesquisa: (1) O tempo de floração das gramíneas do semiárido sofre alterações com a mudança do clima?; (2) Quais variáveis climáticas influenciam a fenologia reprodutiva das gramíneas? Com isso, o objetivo principal da pesquisa é identificar a influência das variáveis climáticas no tempo de floração das gramíneas do Semiárido brasileiro.

Metodologia

(A) Coleta de dados

Foram extraídos 591 espécimes de gramíneas anuais (*Enteropogon mollis* (Nees) Clayton., *Panicum trichoides* Swart, *Paspalum fimbriatum* Kunth e *Paspalum scutatum* Nees ex Trin.), nos herbários brasileiros e nos acervos digitais como o Specieslink, Reflora e Smithsonian National Museum of Natural History no período de 1859-2022. O pico de florescimento dessas gramíneas ocorre no verão/outono, durante e após o período chuvoso na região do semiárido. A área de estudo escolhida foi o Semiárido brasileiro. Espécimes que ocorriam fora dessa delimitação regional foram excluídos, além dos registros sem data de coleta e amostras estéreis. Dados meteorológicos e climáticos da região semiárida do Brasil foram obtidos dos Bancos de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (BDMEP-INMET) e do Instituto Conjunto de Atmosfera e Oceanografia (JISAO). Os dados selecionados para análise climática incluem precipitação média mensal, temperatura média mensal, temperatura máxima mensal, temperatura mínima mensal e a Oscilação Decadal do Pacífico (PDO). Os dados meteorológicos e climáticos a partir de 1960, obtidos no site do BDMEP-INMET, são provenientes das noventa e quatro estações convencionais e automáticas dentro dos limites do semiárido brasileiro.

(B) Análise de dados

A data de coleta dos espécimes de herbário foi convertido em dia do ano (1-365) para ser utilizado como variável resposta. As variáveis preditoras meteorológicas como temperatura média mensal, máxima mensal, mínima mensal e precipitação média mensal foram transformadas em médias anuais, na qual essas variáveis foram relacionadas ao ano anterior ao período de floração. As variáveis geográficas (latitude e longitude) também foram

relacionadas ao tempo de floração. A variável ano foi selecionada como variável preditora, para identificar alguma mudança direcional.

Os dados deste estudo foram processados e analisados no software R Studio 3.3.0. Utilizou-se o modelo de regressão linear simples para observar a relação entre as variáveis. Os valores significativos foram identificados usando o valor-*p* ajustado por Holm como coeficiente estatístico.

Resultados

A temperatura média anual, média máxima e mínima anual foram as variáveis que mais influenciaram no tempo de floração das espécies analisadas (Figura 1). A espécie *Enteropogon mollis* apresentou um atraso no tempo de floração com o aumento da temperatura média anual (+21.2 dias para +1°C; $P < 0.05$), temperatura média máxima anual (+16.3 dias para +1°C; $P < 0.05$) e temperatura média mínima anual (+24.3 dias para +1°C; $P < 0.05$). *Paspalum fimbriatum* também apresentou um atraso no seu florescimento com o aumento da temperatura média anual (+18.6 dias para +1°C; $P < 0.05$), temperatura média máxima anual (+16.3 dias para +1°C; $P < 0.05$) e temperatura média mínima anual (+28 dias para +1°C; $P < 0.05$). Duas espécies (*P. trichoides* e *P. scutatum*) não apresentaram mudança no tempo de floração em relação às variáveis de temperatura.

A Oscilação Decadal do Pacífico influenciou no tempo de floração de *E. mollis* que atrasou o florescimento nos períodos de El Niño (+12.7 dias para +0,1 PDO). O tempo de floração de todas as espécies não apresentou alteração significativa em relação à precipitação média anual.

As variáveis geográficas também interferiram nas respostas do tempo de florescimento das gramíneas (Figura 2). *Enteropogon mollis* respondeu com atraso na floração em direção leste do Semiárido brasileiro (+12,7 dias para +1° de longitude, $P < 0,001$) e com aceleração ao norte (-7,2 dias para +1° de latitude, $P < 0,001$). *Panicum trichoides* apresentou um atraso no seu florescimento ao leste (+18,2 dias para +1° de longitude, $P < 0,001$) e adiantamento no sentido norte (-5,3 dias para +1° de latitude, $P < 0,05$). *Paspalum scutatum* também apresentou um atraso no tempo de floração na direção leste (+13,1 dias para +1° de longitude, $P < 0,001$). Nenhuma espécie analisada apresentou mudança direcional contínua ao longo dos anos de observação.

Discussão

A temperatura é a variável mais determinante na fenologia de algumas gramíneas, que corrobora com diversas pesquisas em que a planta altera seu tempo de florescimento com o aumento da temperatura (Cayan et al., 2001; Cleland et al., 2006; Zhang et al., 2007; Park, 2016; Anderson et al., 2012; Munson & Long, 2017; Geissler et al., 2023). A forma como as gramíneas modificam o seu período de floração em relação ao clima, pode depender de sua história de vida e via fotossintética. Nos estudos de Munson & Long (2017) as gramíneas do tipo C4 responderam com atraso no tempo de florescimento em relação ao aumento da temperatura, como as espécies estudadas *E. mollis* e *P. fimbriatum* que também apresentaram retardamento no tempo de floração com o aumento da temperatura, ambas do tipo C4 (Brandner & Salvucci, 2002; Silveira, 2014).

O atraso no tempo de floração de *E. mollis* relacionado aos eventos de El Niño pode demonstrar a influência das secas do semiárido brasileiro nas mudanças do tempo de floração, visto que as alterações na temperatura da superfície do mar no Pacífico tropical que se apresentam como eventos de El Niño podem interferir na variabilidade da precipitação nesta região através de mudanças na circulação de Walker direcionada zonalmente (Ambrizzi et al., 2004; Marengo et al., 2016).

As respostas relacionadas às variáveis geográficas podem estar relacionadas a diversos fatores abióticos que influenciam no tempo de floração, como a sazonalidade das chuvas, temperatura, umidade e tipos do solo (Quintino et al., 2018; Silva et al., 2021). Em relação a longitude, as espécies *E. mollis*, *P. trichoides* e *P. scutatum* demonstraram um atraso no florescimento no sentido leste, onde a temperatura média é mais amena durante o ano, mas apresenta umidade do solo menos úmido na maior parte do ano (Barroso et al., 2018; Lapis, 2018). Em contrapartida, as espécies *E. mollis* e *P. trichoides* apresentaram uma relação positiva com a latitude, na qual o florescimento foi acelerado no sentido norte. Esta diferença também pode estar relacionada à sazonalidade do clima no Semiárido brasileiro, variando conforme a localização, como na região setentrional (norte), a concentração das chuvas ocorre no verão que são influenciadas pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), com máxima na temperatura no mês de novembro e mínima no mês de junho, enquanto na região oriental (leste), a concentração das chuvas ocorre no outono, influenciadas pela Massa Tropical Atlântica (MTA) e ZCIT, com máxima na temperatura no mês de março e mínima no mês de julho (Wanderley, 2020).

Na relação fenologia-clima, espera-se que o período de floração da população esteja em equilíbrio com o clima ao longo prazo, pois a produção reprodutiva pode ser consideravelmente menor se os picos de floração ocorrerem durante os períodos

desfavoráveis como calor extremo e escassez de água (Nicotra et al., 2010). Outros fatores não climáticos também desempenham um papel nas alterações fenológicas ao longo do tempo, tais como o fotoperíodo, uso e ocupação do solo, invasão biológica, estado nutricional da planta e características físicas do solo que alteram a disponibilidade da água (Bertin, 2008).

As gramíneas anuais têm a capacidade de acompanhar as rápidas taxas das mudanças climáticas, na qual, as respostas fenológicas frente a alteração do clima dependerá da variação na temperatura, que pode ser sazonal e espacialmente dependente a partir de uma região em que elas estejam inseridas, onde a mesma espécie pode retardar seu florescimento em uma determinada localidade e acelerar em outra, ambas com a mesma temperatura (Crimmins et al., 2011; Munson & Long, 2017).

Conclusão

A mudança no clima altera o tempo de floração das gramíneas anuais do Semiárido brasileiro, sendo a temperatura o fator condicionante dessas alterações nos padrões fenológicos, resultando no retardamento do florescimento de *E. mollis* e *P. fimbriatum* à medida que a temperatura aumenta. O fenômeno do El Niño influencia no tempo de floração das gramíneas que pode estar relacionado ao aumento dos períodos de seca nesta região. As duas espécies que não responderam às variáveis climáticas (*P. trichoides* e *P. scutatum*), apresentaram junto com *E. mollis* respostas significativas em relação às variáveis geográficas. Este resultado levanta diversas hipóteses associadas aos gradientes geográficos e fatores não climáticos que podem interferir no tempo de florescimento das espécies a partir da localização em que ela ocupa, sendo sugerido a produção de outras pesquisas que investiguem esta relação fenológica-geográfica. O conhecimento das respostas no tempo de floração das gramíneas em relação ao clima pode aprimorar nossas previsões quanto ao desempenho futuro das plantas diante das mudanças climáticas.

Referências

Anderson JT, Inouye DW, McKinney AM, Colautti RI, Mitchell-Olds T. 2012. Phenotypic plasticity and adaptive evolution contribute to advanced flowering phenology in response to climate change. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 283: 3843–3852.

Ambrizzi T, Souza EB, Pulwarty RS. 2004. The Hadley and Walker regional circulations and associated ENSO impacts on the South American seasonal rainfall. In: Diaz HF; Bradley RS. (eds). **The Hadley Circulation: Present, Past and Future**. Kluwer, Dordrecht, 21, pp 203-235.

Authier, A., Cerdán, P., Auge, G. 2023. Non-stressful Temperature Changes Affect Intergenerational Phenotypic Plasticity Across the Life Cycle of Arabidopsis Thaliana Plants. **OSF Preprints**. February 16. doi:10.31219/osf.io/fb8zq.

Barroso RM, Muñoz AEP, Tahim EF, Webber DC, Filho ACA, Filho MXP, et al. 2018. Diagnóstico da cadeia de valor da tilapicultura no Brasil. Brasília, DF : **Embrapa**.

Bernstein, L., Bosch, P., Canziani, O., Chen, Z., Christ, R., & Riahi, K. 2008. **IPCC**, 2007: climate change 2007: synthesis report.

Bertin RI. 2008. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change. **Journal of the Torrey Botanical Society** 135: 126–146.

Calinger, K. M., Queenborough, S., & Curtis, P. S. 2013. Herbarium specimens reveal the footprint of climate change on flowering trends across north-central North America. **Ecology letters**, 16(8), 1037-1044.

Crimmins T, Crimmins MA, Bertelsen CD. 2011. Onset of summer flowering in a “Sky Island” is driven by monsoon moisture. **New Phytologist** 191: 468–479.

Brandner CSJ, Salvucci ME. 2002. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. **Plant Physiol.** Aug;129(4):1773-80.

DeWitt TJ, Sih A, Wilson DS. 1998. Costs and limits of phenotypic plasticity. **Trends in Ecology and Evolution** 13:77–81

Geissler C, Davidson A, Niesenbaum RA. 2023. The influence of climate warming on flowering phenology in relation to historical annual and seasonal temperatures and plant functional traits. **PeerJ**. Apr 21;11:e 15188.

Knapp AK, Smith MD. 2001. Variation among biomes in temporal dynamics of above ground primary production. **Science** 291: 481–484.

Lang, P. L., Willems, F. M., Scheepens, J. F., Burbano, H. A., & Bossdorf, O. 2019. Using herbaria to study global environmental change. **New phytologist**, 221(1), 110-122.

Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélite (LAPIS). 2018. Umidade do solo no Semiárido brasileiro é monitorada pelo Lapis. *Ascom Universidade Federal de Alagoas*.

Masson-Delmotte, V. P., Zhai, P., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., ... & Scheel Monteiro, P. M. 2021. **Ipcc, 2021: Summary for policymakers**. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group i to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.

Marengo, J. A., Cunha, A. P., & Alves, L. M. 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climanalise*, 3(1), 49-54.

Munson, S. M., & Long, A. L. 2017. Climate drives shifts in grass reproductive phenology across the western USA. **New Phytologist**, 213(4), 1945-1955.

Munson, S. M., & Sher, A. A. 2015. Long-term shifts in the phenology of rare and endemic Rocky Mountain plants. **American journal of botany**, 102(8), 1268-1276.

Nicotra AB, Atkin OK, Bonser SP, Davidson AM, Finnegan EJ, Mathesius U, Poot P, Purugganan MD, Richards CL, Valladares Fetal. 2010. Plant phenotypic plasticity in a changing climate. **Trends in Plant Science** 15:684–692.

Park IW, Schwartz MD. 2015. Long-term herbarium records reveal temperature-dependent changes in flowering phenology in the southeastern USA. **International Journal of Biometeorology** 59: 347–355.

Parton WJ, Scurlock JMO, Ojima DS, Schimel DS, Hall DO. 1995. Impact of climate change on grassland production and soil carbon worldwide. **Global Change Biology** 1:13–22.

Pereira, R. Araújo, F. J. Lima, R. Paulino F. Lima, A. 1989. Estudo fenológico de algumas espécies lenhosas e herbáceas da caatinga, **Revista Ciência Agronômica**, vol. 20, no. 1-2, pp. 11–20.

Primack D, Imbres C, Primack RB, Miller-Rushing AJ, Del Tredici P. 2004. Herbarium specimens demonstrate earlier flowering times in response to warming in Boston. **American Journal of Botany** 91: 1260–1264.

Quintino LF, Ávila MA, Antunes JR, Figueiredo JCC, et al., 2018. Influência da umidade do solo na floração e frutificação de *Mauritiella armata* Mart. (Arecaceae). 12° FEPEG. ISSN: 1806.549X.

Rosenzweig C, Parry ML. 1994. Potential impact of climate change on world food supply. **Nature** 367: 133–138.

Sala O.E., Paruelo J.M. 1997. Ecosystem services in grasslands. In: Daily GC, ed. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Washington, DC, USA: Island Press, 237–252.

Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. **Nature** 413: 591–596.

Silva TRG, Costa MLA, Farias LRA, Santos MA, Lima Rocha JJ, & Silva JV. 2021. Fatores abióticos no crescimento e florescimento das plantas. **Research, Society and Development**, 10(4).

Silveira, Márcia Cristina Teixeira. 2014. Informações sobre plantas forrageiras C4 para cultivo em condições de deficiência de drenagem e tolerância a frio [recurso eletrônico] / Márcia Cristina Teixeira da Silveira, Naylor Bastiani Peres. — Dados eletrônicos. — Bagé : **Embrapa Pecuária Sul**. (Documentos / Embrapa Pecuária Sul, ISSN 1982-5390 ; 128)

Vaz, A.P.A., dos SANTOS, H. P., Zaidan, L. B. P. 2008. Floração. **Embrapa**.

Visser, M. 2022. Phenology: Climate change is shifting the rhythm of nature. *Frontiers* 2022: Noise, Blazes and Mismatches: Emerging Issues of Environmental Concern, **United Nations Environment Programme (UNEP)**:41-58.

Wanderley, L. S. A. Proposta de classificação climática da Região Nordeste do Brasil baseada na abordagem sinótica dos tipos de tempo. Tese (Doutorado) - **Universidade Federal de Pernambuco**, CFCH. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Recife, 2020.

Zhang X, Tarpley D, Sullivan JT. 2007. Diverse responses of vegetation phenology to a warming climate. **Geophysical Research Letters** 34: L19405.

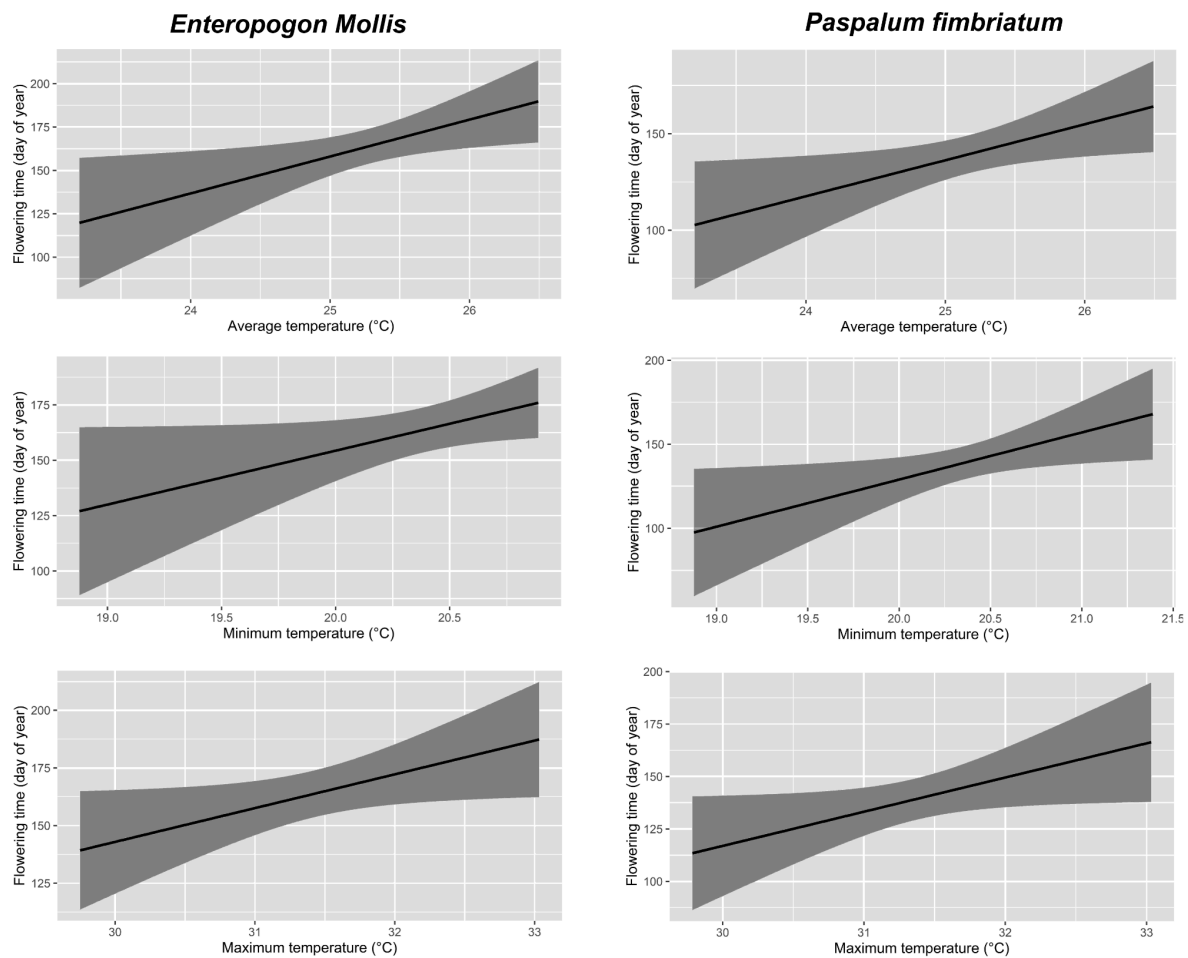


Figura 1. Regressão linear do tempo de florescimento em relação à temperatura média anual, temperatura média mínima anual e média máxima anual de duas espécies de gramíneas (*E. mollis* e *P. fimbriatum*).

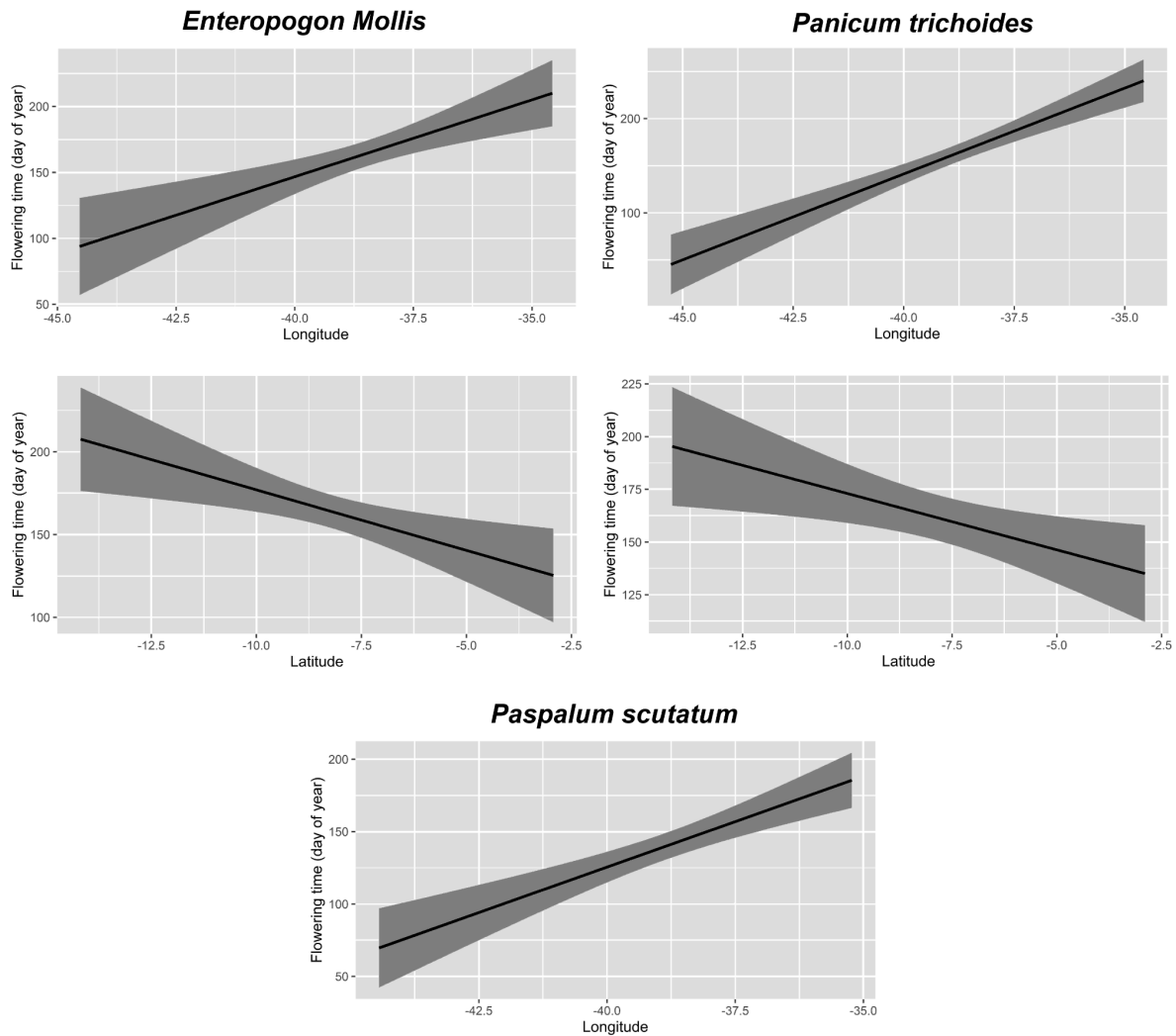


Figura 2. Regressão linear do tempo de floração em relação a longitude e latitude de três espécies de gramíneas (*E. mollis*, *P. fimbriatum* e *P. scutatum*).

Considerações finais

O estudo analisou as mudanças morfológicas em gramíneas no Semiárido brasileiro devido às alterações climáticas desde o século XIX, especialmente nos últimos 62 anos com um aumento de 1,89°C na temperatura média anual. As espécies de gramíneas no Semiárido brasileiro têm experimentado reduções no tamanho de seus órgãos vegetativos e reprodutivos ao longo dos anos de observação. Constatou-se que a temperatura é a principal variável climática influenciando tais mudanças, rejeitando a hipótese do papel da precipitação. Evidenciou-se também variações regionais nas características morfológicas que indica a capacidade das gramíneas de ajustarem seus tamanhos em resposta às condições locais. Essas descobertas têm implicações para a ecologia, evolução e adaptação dessas espécies,

apontando a necessidade de futuras pesquisas para compreender melhor os mecanismos genéticos subjacentes e as vulnerabilidades regionais da biodiversidade frente às mudanças climáticas.

A temperatura também desempenha um papel crucial na fenologia de diversas gramíneas no Semiárido brasileiro, influenciando seu tempo de floração. As respostas fenológicas podem variar de acordo com a história de vida e a via fotossintética, especialmente para gramíneas do tipo C4. O atraso no tempo de floração de *E. mollis*, associado a eventos de El Niño, sugere uma influência das secas na região nesse processo.

As variáveis geográficas, como longitude e latitude, demonstraram padrões distintos de atraso e aceleração do florescimento, indicando a influência da sazonalidade do clima. Destaca-se que as gramíneas anuais têm a capacidade de ajustar seu tempo de floração em resposta às mudanças climáticas, com a temperatura sendo o principal condicionante. O fenômeno do El Niño impacta diretamente no tempo de floração, relacionado ao aumento dos períodos de seca. As respostas às variáveis geográficas abrem caminho para hipóteses sobre gradientes geográficos e fatores não climáticos. Essas descobertas ressaltam a importância de pesquisas adicionais para compreender melhor essa relação, contribuindo para previsões mais precisas sobre o desempenho futuro das plantas frente às mudanças climáticas.