
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, EVOLUÇÃO E
BIODIVERSIDADE**

**O EFEITO DA FUMAÇA AEROSSOL NA GERMINAÇÃO E NO
DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE ESPÉCIES DO CERRADO**

RAQUEL GASPARINI MARTINS



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, EVOLUÇÃO E
BIODIVERSIDADE**

**O EFEITO DA FUMAÇA AEROSSOL NA GERMINAÇÃO E NO
DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE ESPÉCIES DO CERRADO**

RAQUEL GASPARINI MARTINS

Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Ecologia, Evolução e Biodiversidade.

Orientadora: Profa. Assoc. Alessandra Fidelis

Coorientadora: Ma. Heloiza Zirondi

**Rio Claro – SP
2023**

M386e Martins, Raquel Gasparini
O efeito da fumaça aerossol na germinação e no desenvolvimento de plântulas de espécies do Cerrado / Raquel Gasparini Martins. -- Rio Claro, 2023
55 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Biociências, Rio Claro
Orientadora: Alessandra Tomaselli Fidelis
Coorientadora: Heloiza Lourenço Zirondi

1. Fumaça. 2. Germinação. 3. Plântula. 4. Pós-fogo. 5. Cerrado. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: O EFEITO DA FUMAÇA AEROSSOL NA GERMINAÇÃO E NO DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE ESPÉCIES DO CERRADO

AUTORA: RAQUEL GASPARINI MARTINS

ORIENTADORA: ALESSANDRA TOMASELLI FIDELIS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ecologia e Biodiversidade, área: Biodiversidade pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. ALESSANDRA TOMASELLI FIDELIS (Participação Virtual)
Departamento de Biodiversidade / Unesp - IB Rio Claro

Documento assinado digitalmente

ALESSANDRA TOMASELLI FIDELIS

Data: 31/05/2023 11:06:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. ROBERTA DAYRELL DE LIMA CAMPOS (Participação Virtual)
Royal Botanic Gardens



Profa. Dra. SOIZIG ANNE LE STRADIC (Participação Virtual)
UMR INRAE / Université de Bordeaux



Rio Claro, 25 de maio de 2023

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais, por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos, proporcionando as melhores condições para que eu pudesse alcançá-los. Não existem palavras suficientes para demonstrar a minha gratidão a vocês.

Às minhas irmãs e “cunhas” por sempre estarem ao meu lado e me acolherem. Aos meus tios Lê e Rina, pelas conversas em que compartilho inúmeras inseguranças, mas que no final, sempre me fazem enxergar que a vida está só começando. Também agradeço ao meu pequeno grande amigo e sobrinho Chico, por sempre me lembrar de me orgulhar que sou “cientista das plantas”. Obrigada, família!

Agradeço também por fazer parte do LeVeg. Alê, muito obrigada por confiar em mim e ter deixado a porta aberta para que eu voltasse. Alê e Helô, muito obrigada pela paciência, ensinamentos, correções e pela construção desse trabalho. Helô, obrigada por me apresentar ao mundo das sementes, ele é incrível! Aos amigos do LeVeg: vocês são incríveis! Obrigada pela coleção de memórias com vocês, seja carregando toneladas de solo para o experimento na casa de vegetação ou em momentos de desespero às segundas-feiras (leia-se figurinha do periquito verde).

À família Vilela de Andrade, que me acolheu como filha. Principalmente, ao meu companheiro, Rafael, pelo apoio e carinho de sempre durante essa caminhada.

Obrigada à equipe Personow e aos amigos da corrida, em especial: Lidi, Sandra, Paloma, Anne, Na, Marcelo, Alê, Leo e Rê. Vocês não têm ideia do quanto me ajudaram durante o mestrado, afinal Mens sana in corpore sano. Bora correr que a meia maratona está logo ali!

Aos amigos que a Unesp vem me presenteando desde 2013 e que levarei por toda a vida.

Agradeço também às agências financiadoras deste projeto: processo nº 2020/07731-4, nº 2020/15891-1 e nº 2019/09903-0, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (312689/2021-7).

Beta e Soizig, obrigada por aceitarem o convite para compor a minha comissão examinadora. Fico muito feliz e orgulhosa de apresentar a minha dissertação para uma banca composta apenas por mulheres cientistas.

Aos funcionários da Unesp: pessoal do Jardim Experimental, da manutenção e Naiara. Obrigada!

Por fim, agradeço à instituição responsável pelo que sou hoje: Unesp! Foram 10 anos de muita vivência e construção.

Ah, e eu não poderia deixar de agradecer a mim mesma, né? Tenho orgulho do trabalho que fiz e do meu crescimento pessoal e profissional, mesmo que, em vários momentos, pensei que não seria capaz de chegar até aqui, e aqui estou escrevendo os agradecimentos da minha dissertação.

“Que a importância de uma coisa não se mede com fita métrica, nem com balanças, nem barômetros etc. Que a importância de uma coisa há que ser medida pelo encantamento que a coisa produza em nós.” Manoel de Barros. VIVA O CERRADO!

RESUMO GERAL

Em vegetações inflamáveis o fogo é um distúrbio natural e as espécies presentes nessas vegetações apresentam adaptações, as quais possibilitam a permanência do indivíduo após a passagem do fogo. Além do fogo, a fumaça possui compostos químicos capazes de estimular a germinação e influenciar no desenvolvimento da plântula. O Cerrado é uma vegetação inflamável, portanto, esse projeto visou compreender o efeito da fumaça na germinação e no desenvolvimento da plântula de espécies do Cerrado. Para isso, foi aplicada a fumaça aerossol nas sementes e nas plântulas. As sementes tiveram a germinação acompanhada por 30 dias e as plântulas por 9 meses. Os seguintes atributos de germinação e de plântula foram medidos: porcentagem de germinação, tempo médio de germinação, sincronia de germinação, comprimento aéreo (CA) e radicular (CR), peso aéreo (PA), peso radicular (PR), peso do órgão (PO), número de folhas, perfilhos e ramos. As medições das plântulas foram realizadas após 1, 3, 6 e 9 meses a partir da aplicação do tratamento. O índice de vigor da plântula (IVP) também foi medido para plântulas com 7 e 14 dias de vida. Dentre as 37 espécies, 32.44% responderam a fumaça: 5.4% aumentaram e 2.7% diminuíram a germinação, 13.5% germinaram mais rápido e 8.1% germinaram mais devagar, 2.7% germinaram sincronicamente e 5.4% germinaram assincronicamente. Entretanto, 67.56% não tiveram diferença nos atributos de germinação em comparação ao controle. Em relação ao vigor medido no 7º dia após a protrusão da raiz, dentre as 8 espécies estudadas em resposta ao tratamento: 12,5% aumentaram o IVP, o CA e CR; 25% diminuíram o IVP; 12,5% diminuíram o CR e 25% diminuíram o CA. Quando o vigor foi medido no 14º dia após a germinação, dentre as 8 espécies em resposta à fumaça: 12,5% aumentaram o IVP, 50% diminuíram o IVP, 12,5% aumentaram o CR, 25% diminuíram o CR e 12,5% diminuíram o CA. Dentre as 3 espécies de plântulas expostas à fumaça, somente as plântulas de *Sporobolus cubensis* com 3 meses de idade apresentaram: CR, CA, PR e PA menores em relação ao controle. Entretanto, as plântulas de *Dyckia brasiliensis* com 6 meses de idade, apresentaram maior PA quando expostas à fumaça. Logo, é possível concluir que a fumaça tem efeito diferente de acordo com a fase de vida em que a planta é exposta à fumaça.

Palavras-chave: fogo, pós-fogo, germinação, atributos de germinação, vigor, plântula, fumaça, Cerrado.

ABSTRACT

In flammable vegetables or fire is a natural disorder and the species present in these vegetations have adaptations, which makes it possible for the individual to remain after the passage of fire. In addition to fire, smoke has chemicals capable of stimulating germination and influencing seedling development. Cerrado is a flammable vegetation, therefore, this project aims to understand the effect of smoke on germination and seedling development of Cerrado species. For this, an aerosol smoke was applied to the seeds and seedlings. The seeds had their germination monitored for 30 days and the seedlings for 9 months. The following germination and seedling attributes were measured: germination percentage, mean germination time, germination synchrony, aerial (CA) and root (CR) length, aerial weight (AP), root weight (PR), organ weight (PO), number of leaves, profiles and branches. The proportions of the seedlings were carried out after 1, 3, 6 and 9 months from the application of the treatment. The seedling vigor index (SVI) was also measured for 7- and 14-day-old seedlings. Among the 37 species, 32.44% responded to smoke: 5.4% increased and 2.7% decreased germination, 13.5% germinated faster and 8.1% germinated slower, 2.7% germinated synchronously and 5.4% germinated asynchronously. However, 67.56% had no difference in germination attributes compared to the control. Regarding the vigor measured on the 7th day after root protrusion, among the 8 scientific species in response to treatment: 12.5% increased IVP, CA and CR; 25% decreased PIV; 12.5% decreased CR and 25% decreased CA. When vigor was measured on the 14th day after germination, among the 8 species in response to smoke: 12.5% increased IVP, 50% decreased IVP, 12.5% increased CR, 25% decreased CR, and 12.5% decreased CA. Among the 3 species of seedlings exposed to smoke, only seedlings of *Sporobolus cubensis* with 3 months of age were the same: CR, CA, PR and PA smaller in relation to the control. However, 6-month-old *Dyckia brasiliensis* seedlings had higher BP when exposed to smoke. Therefore, it is possible to conclude that smoke has a different effect according to the life stage in which the plant is exposed to smoke.

Keywords: fire, post-fire, germination, germination attributes, vigor, seedling, smoke, Cerrado.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....8

Estrutura da dissertação.....	10
Referências.....	10

A FUMAÇA AEROSSOL INFLUÊNCIA NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES DO CERRADO?.....14

Resumo.....	14
Introdução.....	15
Material e Métodos.....	17
Resultados.....	19
Discussão.....	26
Material suplementar.....	28
Referências.....	35

A FUMAÇA AEROSSOL INFLUENCIA NO DESENVOLVIMENTO DE PLÂNTULAS DE ESPÉCIES DO CERRADO?.....40

Resumo.....	40
Introdução.....	41
Material e Métodos.....	42
Resultados.....	44
Discussão.....	46
Referências.....	48

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....51

Referências.....	52
------------------	----

INTRODUÇÃO GERAL

O Cerrado é o segundo maior domínio fitogeográfico da América do Sul (Ab'Saber, 1977), ocupando originalmente 2 milhões de km² (Silva & Bates, 2002). É a savana com a maior biodiversidade em plantas do mundo, considerada um dos *hotspot* mundiais para conservação da biodiversidade, pois está sob fortes ameaças humanas (Mittermeier *et al.*, 2011; Strassburg *et al.*, 2017). Assim como em outros ecossistemas pirofíticos (Bond & Keeley, 2005), o fogo no Cerrado desempenha um papel evolutivo (Simon *et al.*, 2009; Simon & Pennington, 2012), selecionando características que permitem às plantas resistir e persistir a esse distúrbio. Portanto, o fogo tem sido um fator importante na manutenção da vegetação do Cerrado (Coutinho, 1990; Mistry, 1998).

O fogo no Cerrado ocorre de maneira rápida e pouco intensa, atingindo baixas temperaturas máximas em curtos tempos de duração. Temperaturas acima de 100°C por mais de 150 segundos são pouco prováveis de acontecer (Rodrigues *et al.*, 2021). Em ambientes onde a frequência do fogo é alta, como savanas tropicais (Eiten *et al.*, 1972), a estratégia de regeneração pós-fogo mais recorrente é o rebrote, havendo uma pequena porcentagem das espécies que persistem exclusivamente via germinação no sistema após a passagem do fogo (germinadoras, Pilon *et al.*, 2021; Zupo *et al.*, 2021). Em comparação ao Cerrado, nos ecossistemas Mediterrâneos, onde a frequência do fogo é menor e o fogo é mais intenso, há uma maior porcentagem de espécies que regenera apenas via germinação após a passagem do fogo (Lloret *et al.*, 2000).

A fumaça é um dos produtos do fogo e muitos compostos químicos presentes na fumaça podem estimular a germinação de sementes (Lamont *et al.*, 2018). O estímulo da germinação é atribuído muitas vezes a carriquina (KARs) (Flematti *et al.*, 2004; Flemattiet al., 2011 Keeley & Pausas, 2018). O composto é formado durante a queima da matéria vegetal a partir da combustão do material polimérico da parede celular primária (Patwardhan *et al.*, 2011). KARs estão presentes na fumaça e serão absorvidos pelo solo e pelas sementes, por meio da difusão do composto através da lixiviação do solo (Keeley & Pausas, 2018).

A carriquina não é o único componente da fumaça que promove a germinação. Outros compostos, incluindo compostos inorgânicos (NO, etileno) e cianidrina também possuem essa capacidade de promover a germinação. Recentemente, um composto pirolítico presente na fumaça e oriundo da queima da lignina também foi descrito como promotor de germinação, o Siringaldeído (SAL) (Cao *et al.*, 2021). Apesar de não se ter informação qual desses compostos específicos estão agindo, estudos realizados com espécies de *campo sujo*, mostraram que a

fumaça estimulou a germinação de espécies de Fabaceae, Velloziaceae e Melastomataceae (Zirondi *et al.*, 2019a,b), mas diminuiu a germinação em espécies de Lamiaceae e Xyridaceae de campos úmidos (Fichino *et al.*, 2016). De acordo com estudos prévios, entre vegetação, família e espécie parece não haver um padrão de resposta da germinação em relação à fumaça.

Além da germinação, a fumaça pode afetar outros estágios do ciclo de vida da planta. Estudos têm investigado o potencial da fumaça no desenvolvimento das plântulas. Plântulas provenientes de sementes expostas à fumaça apresentaram maior vigor (Sparg *et al.*, 2005), raízes e ramos mais longos (Sparg *et al.*, 2006; Moreira *et al.*, 2010; Yearsley *et al.*, 2018; Aslam *et al.*, 2019, Ghebrehiwot *et al.*, 2019) e aumento da biomassa (Yearsley *et al.*, 2018). Plântulas que crescem mais rápido e possuem um robusto sistema radicular obtêm vantagem competitiva no cenário pós fogo (Yearsley *et al.*, 2018), pois conseguem ocupar os espaços recém abertos mais rapidamente.

Entender a relação da germinação e do desenvolvimento da plântula com a fumaça, são processos muito importantes para compreender a dinâmica da regeneração pós fogo do Cerrado, assim como o processo de montagem da comunidade vegetal do ecossistema. Diante da relevância da compreensão da dinâmica do Cerrado no cenário pós fogo e seus impactos, é imprescindível a construção progressiva do conhecimento básico da influência da fumaça na germinação das sementes, no desenvolvimento das plântulas e nos atributos de germinação das sementes em espécies do Cerrado. Além disso, estudos que avaliem quais fatores podem contribuir no aumento da germinação de sementes de espécies de Cerrado são extremamente importantes para melhoria das técnicas de restauração, contribuindo para a conservação do Cerrado.

Atualmente, uma das técnicas que vem sendo empregada para restauração de áreas abertas de Cerrado é a semeadura direta (Silva *et al.*, 2015; Pelizzaro *et al.*, 2017; Schmidit *et al.*, 2018). O uso de produtos da fumaça são opções viáveis para o pré-tratamento de grandes volumes de sementes, já que a fumaça consegue maximizar o potencial de germinação, melhorando os resultados da restauração (Erickson *et al.*, 2016). Sendo assim, caso o efeito da fumaça seja positivo na germinação de espécies, será possível utilizar esse método em projetos de restauração do Cerrado, como já acontece em outras vegetações inflamáveis ao redor do mundo (Rokich & Dixon, 2007; Erickson *et al.*, 2016). Sendo assim, neste estudo, buscamos avaliar as respostas das sementes e das plântulas de espécies do Cerrado quando expostas à fumaça. Tem-se como hipótese que a fumaça influenciará positivamente as espécies, aumentando a porcentagem de germinação de sementes em um período de tempo menor, e desenvolvendo plântulas mais vigorosas, com maior comprimento aéreo e radicular e com

maior produção de biomassa.

Estrutura da dissertação

Os capítulos foram elaborados em forma de manuscrito em português, e na formatação da revista científica de interesse, da seguinte forma:

Capítulo I: “A fumaça aerossol influencia na germinação de espécies do Cerrado?”. Neste capítulo avaliamos a influência da fumaça na germinação das espécies de comunidades de plantas do Cerrado, avaliando ao todo 37 espécies de diferentes formas de crescimento (graminóides, herbáceas, arbustos e árvores) e tipos de vegetação (campo sujo e campo rupestre). Também observamos a relação entre a fumaça, o tempo médio de germinação e sincronia de germinação das espécies. Por fim, avaliou-se os efeitos da fumaça no desenvolvimento e vigor de plântulas de espécies nativas. Tem-se como hipótese que a fumaça aumentará a porcentagem de germinação e sincronia em um menor tempo de germinação, e que as sementes expostas à fumaça resultarão em plântulas com maior vigor em relação às sementes que não foram expostas ao tratamento. Este capítulo será submetido para o Journal of Vegetation Science.

Capítulo II: “A fumaça aerossol influencia no desenvolvimento de plântulas do Cerrado? Neste capítulo avaliamos os efeitos da fumaça na fase seguinte da germinação: o estágio de plântula. Analisamos a influência da fumaça no crescimento das partes aéreas e subterrâneas dos indivíduos. Tem-se como hipótese que haverá um aumento no crescimento aéreo, radicular e no vigor das plântulas em resposta à fumaça, além do aumento da biomassa. Este capítulo será submetido para Plant Ecology.

REFERÊNCIAS

Ab' Saber, N.A (1977) Os Domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. Geomorfologia, 52, 1-21.

Bond, W.J. & van Wilgen, B.W. (1996) Fire and Plants (population and community biology series 14). Berlim. Springer.

Erickson, T.E., Shackelford, N., Kingsley, W.D., Turner, R.S. & Merritt, D.J. (2016) Overcoming physiological dormancy in seeds of *Triodia* (Poaceae) to improve restoration in the arid zone. *Restoration Ecology*, 24, 64-76.

Eiten, G. (1972) The cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, 38, 201-341.

Fichino, B.S., Dombroski, J.R.G., Pivello, V.R. & Fidelis, A. (2016) Does Fire Trigger Seed Germination in the Neotropical Savannas? Experimental Tests with Six Cerrado Species. *Biotropica*, 48, 181-187.

Flematti, G.R., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W. & Trengove, R.D. (2004) A compound from smoke that promotes seed germination. *Science*, 305, 977.

Flematti, G.R., Merritt, D.J., Piggott, M.J., Trengove, R.D., Smith, S.M., Dixon, K.W. et al. (2011) Burning vegetation produces cyanohydrins that liberate cyanide and stimulate seed germination. *Nature Communications*, 2, 360.

Keeley, J.E. & Pausas, J.G. (2018) Evolution of ‘smoke’ induced seed germination in pyroendemic plants. *South African Journal of Botany*, 115, 251-255.

Lamont, B. B., He, T. & Yan, Z. (2018) Evolutionary history of fire-stimulated resprouting, flowering, seed release and germination. *Biological reviews*, 94, 903-928.

Lloret, F., Verdú, M., Flores-Hernandez, N. & Valient-Nanuet, A. (2000) Fire and resprouting in Mediterranean ecosystems: insights from an external biogeographical region, the mexical shrubland. *American Journal of Botany*, 86, 1655-1661.

Mistry, J. (1998) Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 22, 425-448.

Mittermeier, R.A., Turner, W.R., Larsen, F.W., Brooks, T.M & Gascon, C. (2011) Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. In: Zachos, F.E., Habel, J.C. (eds). *Biodiversity Hotspots: distribution and protection of conservation priority areas*. Berlin: Springer, 3-22.

Moreira, B., Tormo, J., Estrelles, E. & Pausas, J.G. (2010) Disentangling the role of heat and smoke as germination cues in Mediterranean Basin flora. *Annals of Botany*, 105, 627-635.

Patwardhan, P.R., Brown, R.C. & Shanks, B.H. (2011) Product distribution from the fast pyrolysis of hemicellulose. *ChemSusChem*, 4, 636-643.

Pellizzaro, K.F., Cordeiro, A.O.O., Alves, M., Motta, C.P., Rezende, G.M., Silva, R.R.P. *et al.* (2017) “Cerrado” restoration by direct seeding: field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. *Brazilian Journal of Botany*, v. 40, 681-693.

Pilon, N.A.L., Cava, M.G.B., Hoffmann, W.A., Abreu, R.C.R., Fidelis, A. & Durigan G (2021) The diversity of post-fire regeneration strategies in the cerrado ground layer. *Journal of Ecology* 109, 154–166.

Rodrigues, C. A., Zironi, H. L. & Fidelis, A. (2021) Fire frequency affects fire behavior in open savannas of the Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 482.

Rokich, D. P. & Dixon, K.W. (2007) Recent advances in restoration ecology, with a focus on the Banksia woodland and the smoke germination tool. *Australian Journal of Botany*, 55, 375-389, 2007.

Schmidt, I.B., de Urzedo, D.I., Piña-Rodrigues, F.C.M., Vieira, D.L.M., de Rezende, G.M., Sampaio, A.B. (2018) Community-based native seed production for restoration in Brazil: the role of science and policy. *Plant Biology*, 1, 389-397.

Silva, J.M.C. & Bates, J.M. (2002) Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot. *BioScience*, 52, 225-233.

Simon, M F. & Pennington, T. (2012) Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. *International Journal of Plant Sciences*, 173, 711-723.

Simon, M.F., Grether, R & Queiroz, L.P. (2009) Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of the National*

Academy of Science, 106, 20359-20364.

Stanley, D., Rejzek, M., Naested, H., Smedley, M., Otero, S., Fahy, B. et al (2011) The role of α -glucosidase in germinating barley grains. *Plant Physiology*, 155, 932–943.

Strassburg, B.B.N., Brooks, T., Feltran-Barbieri, R. Iribarrem, A., Crouzeilles, R. Loyola, R. et al (2017) Moment of truth for the Cerrado hotspot. *Nature Ecology and Evolution*, 1, 1-3.

Zirondi, H.L., Silveira, F.A.O. & Fidelis, A. (2019) Fire effects on seed germination: heat shock and smoke on permeable vs impermeable seed coats. *Flora*, 253, 98-106.

Zirondi, H.L., José, H.P., Daibes, L.F. & Fidelis, A. (2019) Heat and smoke affect the germination on flammable resprouters: *Vellozia* species in the Cerrado. *Folia GeoBotanica*, 54, 65-75.

Zupo, T., Daibes, L.F., Pausas, J.G. & Fidelis, A. (2021) Post-fire regeneration strategies in a frequently burned Cerrado community. *Journal of Vegetation Science* 32, 1–11.

A FUMAÇA AEROSSOL INFLUÊNCIA NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES DO CERRADO?

Raquel G. Martins¹, Heloiza L. Zironi¹, Alessandra Fidelis¹

¹Lab of Vegetation Ecology, Departamento de Biodiversidade, Laboratório de Ecologia da Vegetação, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, SP, Brazil.

FINANCIAMENTO: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

Perguntas: A fumaça aerossol aumentará a germinação, a sincronia, o comprimento aéreo e radicular e o vigor das espécies de savanas do Cerrado? A fumaça aerossol diminuirá o tempo médio de germinação?

Área de estudo: Parque Nacional da Serra do Cipó, Parque Nacional das Sempre-Viva, Estação Ecológica de Itirapina e Reserva Nacional Serra do Tombador – Brasil.

Métodos: Foi aplicado fumaça aerossol em sementes de 37 espécies nativas do Cerrado. O experimento de germinação durou 30 dias e as sementes germinadas, viáveis e mortas foram contabilizadas. O vigor das plântulas também foram medidos para 8 espécies que tiveram as sementes expostas à fumaça.

Resultados: Quando expostas à fumaça: 5,4% das espécies tiveram a porcentagem de germinação aumentada, 13,5% das espécies germinaram mais rapidamente e 5,4% germinaram mais sincronicamente; 12,5% das espécies apresentaram maior comprimento aéreo, 25% raízes maiores, 25% aumentaram o vigor, 37,5% apresentaram menor parte aérea, 37,5% raízes menores e 50% diminuíram o vigor.

Conclusões: De acordo com os resultados obtidos, que a fumaça tem efeito na regeneração da comunidade no geral, mas que a resposta à fumaça é espécie-específica, representando assim um importante passo para um melhor entendimento das estratégias de regeneração das espécies vegetais do Cerrado, auxiliando para a conservação do bioma.

PALAVRAS-CHAVE: Cerrado, atributos de germinação, vigor, sementes, fumaça aerossol.

INTRODUÇÃO

Plantas de vegetações inflamáveis apresentam adaptações ao fogo que podem ser observadas em diferentes fases de desenvolvimento, como a capacidade de rebrota, serotinia e estímulo da germinação por diferentes mecanismos, sendo a fumaça e o calor os principais (Keeley et al., 2011). De acordo com Keeley et al (2011), as plantas que possuem atributos relacionados ao fogo persistem nesses ecossistemas inflamáveis, beneficiando-se de todas as vantagens ecológicas que a passagem do fogo pode proporcionar, como a diminuição da competição por luz e espaço (Knox & Clarke, 2006; Overbeck et al., 2005), resultado principalmente da remoção temporária da biomassa aérea (Fidelis et al., 2012). Outras modificações ocasionadas pela passagem do fogo incluem alterações no microclima, modificação química do solo, estímulo do rebrotamento e a ciclagem de nutrientes (Whelan, 1995; Bond & Wilgen, 1996; Hoffmann, 1996). As alterações ocasionadas pelo fogo podem afetar os processos de regeneração por sementes, sendo a fumaça um dos fatores mais importantes (Keeley et al., 2011).

A fumaça proveniente da passagem do fogo possui muitos compostos químicos orgânicos e inorgânicos que podem estimular a germinação de sementes (Keeley & Pausas, 2018). O estímulo da germinação pela fumaça é atribuído ao dióxido de nitrogênio (Keeley & Fotheringham, 1997), às cianoidrinas (Flematti et al., 2011; Çatav et al., 2018) e à carriquina (Flematti et al., 2004; Keeley & Pausas, 2018), que é um dos compostos mais estudados da fumaça (Flematti et al., 2004). A carriquina é um regulador de crescimento capaz de interagir com proteínas específicas da semente, formando hidrolases catalisadoras de reações que estimulam a germinação (Stanley et al., 2011). O processo de formação da carriquina ocorre durante a queima da matéria vegetal a partir da combustão do material polimérico da parede celular primária (Patwardhan et al., 2011). Recentemente, um composto pirolítico presente na fumaça e oriundo da queima da lignina também foi descoberto como promotor de germinação, o Siringaldeído (SAL) (Cao et al., 2021).

O estímulo da fumaça na germinação é bem conhecido em diversas famílias, principalmente em ecossistemas Mediterrâneos, como por exemplo: Poaceae, Rubiaceae e Haemodoraceae na Austrália (Dixon et al., 1995; Carthey et al., 2018) e Ericaceae, Lamiaceae, Primulaceae, Betulaceae, Ranunculaceae, Cistaceae e Rhamnaceae na vegetação Mediterrânea européia (Crosti et al., 2005; Moreira et al., 2010; Çatav et al., 2014a, Çatav et al., 2014b),

assim como em espécies de Rubiaceae, Poaceae, Asteraceae e Thymelaeaceae na savana africana (Dayamba et al., 2010).

Além dos efeitos na germinação, a fumaça pode também influenciar no estágio de plântula. Por exemplo, gramíneas nativas do Cerrado demonstraram maior investimento na raiz em resposta à fumaça (Ramos et al., 2019; Sanchez et al., 2022). Além disso, o aumento do vigor de plântulas oriundas de sementes expostas à fumaça também foi observado em diversos estudos (Sparg et al., 2004; Gebrehiwot et al., 2009; Kulkarni et al., 2012). Plântulas que crescem mais rápido e possuem um robusto sistema radicular obtêm vantagem competitiva no cenário pós-fogo (Yearsley et al., 2018), pois conseguem ocupar os espaços recém abertos mais rapidamente.

O Cerrado possui vegetação suscetível ao fogo (Coutinho, 1990) e é o segundo maior domínio fitogeográfico da América do Sul (Ab'Saber, 1977). Originalmente ocupava 2 milhões de km², principalmente na região central do Brasil (Oliveira-Filho & Ratter, 2002). O Cerrado é a savana com a maior biodiversidade em plantas do mundo, possui pelo menos 12.000 espécies de plantas, muitas delas endêmicas (BGF, 2018) e está sob fortes ameaças humanas, sendo por isso considerado um hotspot de biodiversidade (Myers et al., 2000). Assim como em outros ecossistemas pirofíticos, o fogo no Cerrado desempenhou uma pressão evolutiva (Simon et al., 2009; Simon & Pennington, 2012), selecionando características que permitem às plantas resistir e persistir a esse distúrbio. Tais linhagens de plantas com tais adaptações ao fogo das plantas no Cerrado datam de 9.8 a 0.4 milhões de anos (Simon et al., 2009). Portanto, o fogo é um fator importante na manutenção da vegetação do Cerrado (Coutinho, 1990).

Avaliar a relação de atributos funcionais com a fumaça é fundamental para compreender o processo de regeneração pós-fogo do Cerrado. O processo de regeneração é responsável por manter a comunidade vegetal ao longo do tempo através da substituição de indivíduos maduros por novos indivíduos da próxima geração (Grubb, 1977). A partir dos atributos, é possível obter informações sobre como as espécies interagem umas com as outras e com o seu ambiente, e como essas interações influenciam a montagem da comunidade e o funcionamento do ecossistema (Jiménez-Alfaro et al., 2016). Por exemplo, em ecossistemas onde o fogo ocorre, a resposta das espécies à fumaça pode ser um fator relevante para o recrutamento de plantas a partir de sementes (Jiménez-Alfaro et al., 2016). Compreender quais respostas das plantas garantem sucesso na regeneração em um determinado ecossistema, é um passo importante para o desenvolvimento de estratégias eficazes de restauração que promovam a resiliência e persistência da comunidade ao longo do tempo.

Assim sendo, diante da relevância da compreensão dos efeitos da fumaça na regeneração

pós-fogo em savanas tropicais, é imprescindível compreender a relação entre a fumaça e as espécies do Cerrado. Neste estudo, buscamos avaliar como a fumaça aerossol afeta atributos da germinação e vigor de espécies de Cerrado (ex. porcentagem, sincronia e tempo médio de germinação, comprimento aéreo e radicular e com o vigor das plântulas). Partindo do princípio que compostos químicos presentes na fumaça podem influenciar na germinação e no vigor de plântulas, testamos as seguintes hipóteses: (i) a fumaça aumentará a germinação, a sincronia, o comprimento aéreo e radicular e o vigor das espécies de savanas do Cerrado (ii) a fumaça diminuirá o tempo médio de germinação.

MATERIAL E MÉTODOS

1.1 Área de estudo

Sementes de 37 espécies nativas foram coletadas em quatro unidades de conservação de Cerrado. Três destas unidades estão localizadas na região Sudeste do Brasil, sendo estas: i) Parque Nacional da Serra do Cipó (Minas Gerais, PNSC), ii) Parque Nacional das Sempre Vivas (Minas Gerais, PNSV), e iii) Estação Ecológica de Itirapina (São Paulo, EEI). Além destas, uma unidade de conservação é localizada na região Centro-Oeste do Brasil: Reserva Nacional Serra do Tombador (Goiás, RNST). O clima em todas as áreas estudadas é caracterizado por verões chuvosos e invernos secos (Antonelli-Filho, 2011; Alvares et al. 2013; Le Stradic et al. 2018). Dentro destas unidades de conservação, as sementes das espécies estudadas foram coletadas em campo sujo e campo rupestre (Tab. 1).

O campo sujo é composto predominantemente por um estrato herbáceo contínuo e rico em espécies, dominado por gramíneas C4, com a presença de arbustos e pequenas árvores distribuídos de forma esparsa (Coutinho, 1982; Ribeiro & Walter, 1998). Já o campo rupestre é caracterizado por um mosaico de vegetação montanhosa, ocorrendo em altitudes entre 900 m até 2.000 m, composta por gramíneas e arbustos esparsos associados a afloramentos rochosos de quartzito, de ferro e formações de arenito (Silveira et al., 2016). Os solos do campo rupestre são de forma geral rasos, ácidos e extremamente pobres em nutrientes (Oliveira et al., 2015).

Todos os tipos de vegetação são influenciados pelo fogo, mas diferem em relação à frequência e intensidade do fogo. No campo sujo, a vegetação herbácea contínua com predominância de espécies mais inflamáveis uma alta frequência de fogo, com intervalo de 1 a 3 anos de retorno do fogo (Eiten, 1972). Já o fogo no campo rupestre tem a camada de material combustível descontínua, em função da presença de afloramentos rochosos associados à vegetação (Coutinho, 1982), gerando uma frequência de fogo com intervalo de 7 anos (Figueira

et al., 2016).

1.2 Coleta de sementes

A coleta de sementes foi realizada de 2019 a 2022 buscando contemplar sementes de espécies herbáceas, gramíneas, arbustivas e arbóreas, e nos diferentes tipos de vegetação (campo rupestre e campo sujo). No total, foram coletadas sementes de 37 espécies, pertencentes a 13 famílias (Tab. 1). As sementes coletadas foram acondicionadas em sacos de papel kraft, os quais foram imediatamente após a coleta armazenados em sacos ziplock® para reduzir ao máximo a perda de água das sementes até a realização dos experimentos em laboratório. No laboratório, as sementes foram armazenadas em sala refrigerada (~16°C) com baixa umidade (<30%) por no máximo 6 meses. Posteriormente, as sementes foram triadas. Apenas sementes aparentemente viáveis, ou seja morfologicamente íntegras (e.g. sem sinais de predação ou apodrecimento) e cheias foram utilizadas para os experimentos.

Tabela 1. Espécies estudadas de acordo com a família, forma de crescimento e vegetação. Presença de dormência (SI: sem informação; ND: não dormente; PY: dormência física; PD: dormência fisiológica; SI: sem informação), número de sementes por réplica e tempo de armazenamento (meses). CS=campo sujo; CR=campo rupestre; C=controle; SA=fumaça aerosol.

Espécies	Família	Forma de crescimento	Vegetação	UC coletada	Dormência	Número de	Tempo de
						sementes por réplica	armazenamento
<i>Aldama grandiflora</i> (Gardner) E.E.Schill. & Panero	Asteraceae	Herbácea	cs	RNST	ND	4x20	3
<i>Aspilia foliacea</i> (Spreng.) Baker	Asteraceae	Herbácea	cs	RNST	ND	3x10	1
<i>Chromolaena cf horminoide</i> (DC.)	Asteraceae	Arbusto	cr	PNSV	ND	4x20	6
<i>Chromolaena maximiliani</i> (Schrader ex DC.) R.M.King & H.Rob.	Asteraceae	Arbusto	cs	EEI	ND	4x20	6
<i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.) MacLeish	Asteraceae	Árvore	cr	PNSV	ND	5x20	4
<i>Eremanthus</i> sp.	Asteraceae	Arbusto	cs	RNST	SI	4x20	3
<i>Lepidaploa lilacina</i> (Mart. ex DC.) H.Rob	Asteraceae	Arbusto	cr	PNSV	ND	5x20	4
<i>Dyckia brasiliensis</i> L.B.Sm.	Bromeliaceae	Herbácea	cs	RNST	ND	4x20	3
<i>Kielmeyera coriacea</i> Mart. & Zucc.	Calophyllaceae	Árvore	cr	PNSV	ND	4x10	4
<i>Kielmeyera</i> sp. 1 Mart. & Zucc.	Calophyllaceae	Árvore	cr	PNSV	ND	4x15	4
<i>Kielmeyera</i> sp. 2 Mart. & Zucc.	Calophyllaceae	Árvore	cr	PNSV	ND	4x15	4
<i>Bulbostylis paradoxa</i> (Spreng.) Lindm	Cyperaceae	Graminóide	cs	RNST	ND	5x20	1
<i>Comanthera bisulcata</i> (Körn.) L.R.Parra & Giul.	Eriocaulaceae	Herbácea	cr	PNSV	ND	3x20	6

<i>Comanthera elegans</i> (Bong.) L.R.Parra & Giul.	Eriocaulaceae	Herbácea	cr	PNSV	ND	4x20	4
<i>Bauhinia dumosa</i> Benth.	Fabaceae	Arbusto	cs	RNST	ND	4x15	1
<i>Chamaecrista fagonioides</i> (Vogel) H.S.Irwin & Barneby	Fabaceae	Arbusto	cs	RNST	PY	5x20	3
<i>Dalbergia miscolobium</i> Benth.	Fabaceae	Árvore	cr	PNSV	ND	4x15	4
<i>Mimosa kalunga</i> M.F. Simon & C.E. Hughes	Fabaceae	Arbusto	cs	RNST	PY	5x10	1
<i>Mimosa leiocephala</i> Benth.	Fabaceae	Arbusto	cs	RNST	PY	5x19	3
<i>Senna corifolia</i> (Benth.) H.S.Irwin & Barneby.	Fabaceae	Arbusto	cs	RNST	PY	5x15	4
<i>Trimezia juncifolia</i> (Klatt) Benth. & Hook.f.	Iridaceae	Herbácea	cs	RNST	ND	5x10	4
<i>Eriope filifolia</i> Benth.	Lamiaceae	Herbácea	cr	PNSV	ND	5x20	4
<i>Eriope glandulosa</i> (Harley) Harley	Lamiaceae	Herbácea	cs	PNSV	ND	5x20	1
<i>Hyptis remota</i> Pohl ex Benth.	Lamiaceae	Herbácea	cs	RNST	ND	3x10	3
<i>Medusantha mollissima</i> (Benth.) Harley & J.F.B.Pastore.	Lamiaceae	Herbácea	cs	RNST	ND	4x10	3
<i>Diplusodon burchellii</i> Koehne.	Lythraceae	Arbusto	cs	RNST	ND	5x20	5
<i>Diplusodon punctatus</i> Pohl.	Lythraceae	Arbusto	cs	RNST	ND	5x20	5
<i>Microlicia rubra</i> Ferreira-Alves & R.Romero	Melastomataceae	Arbusto	cs	RNST	ND	5x15	1
<i>Stenodon suberosus</i> Naudin.	Melastomataceae	Arbusto	cs	RNST	ND	4x20	3
<i>Tibouchina melastomoides</i> (Naudin) Cogn.	Melastomataceae	Herbácea	cs	RNST	ND	5x20	3
<i>Aristida riparia</i> Trin.	Poaceae	Graminóide	cs	EEI	ND	5x20	6
<i>Loudetiopsis chrysothrix</i> (Nees) Conert.	Poaceae	Graminóide	cr	PNSV	PD	4x15	6

<i>Sporobolus cubensis</i> Hitchc	Poaceae	Graminóide	cs	RNST	PD	5x20	1
<i>Vellozia aloifolia</i> Mart.	Velloziaceae	Vellozia	cr	PNSV	ND	4x12	6
<i>Vellozia caruncularis</i> Mart. ex Seub	Velloziaceae	Vellozia	cr	PNSC	ND	5x10	3
<i>Xyris hilariana</i> Malme	Xyridaceae	Herbácea	cr	PNSC	ND	5x20	3
<i>Xyris peregrina</i> Malme	Xyridaceae	Herbácea	cr	PNSV	ND	5x20	4

1.3 Experimento de germinação com fumaça

Fumaça Aerossol (FA) – As sementes foram expostas à fumaça gerada com auxílio de um fumigador (Fig. 1). Dentro do fumigador, colocamos 20g de biomassa composta por gramíneas e herbáceas nativas de campo sujo da RNST e em seguida colocamos fogo para que ocorresse a produção da fumaça. A fumaça foi transportada até as sementes por meio de um cano de PVC passando por um recipiente de água, responsável por promover o resfriamento da mesma, evitando assim o efeito da alta temperatura (Fig. 1). Na extremidade final do cano, acoplamos um saco plástico vedado (50x60cm) contendo as sementes (mínimo de 10, ver tab. 1), separadas por réplica (3 a 5 réplicas, ver tab. 1) e espécie dentro de placas de Petri destampadas (Fig. 1). Durante 1 minuto a fumaça foi bombeada para dentro do saco plástico. Uma vez saturado de fumaça o saco plástico, as sementes ficaram expostas por 10 minutos à fumaça, baseado em Dixon et al. (1995). A aplicação da fumaça em cada saco plástico ocorreu separadamente por réplica, a fim de evitar a pseudoreplicação. As sementes do tratamento controle não foram expostas a nenhum tratamento.

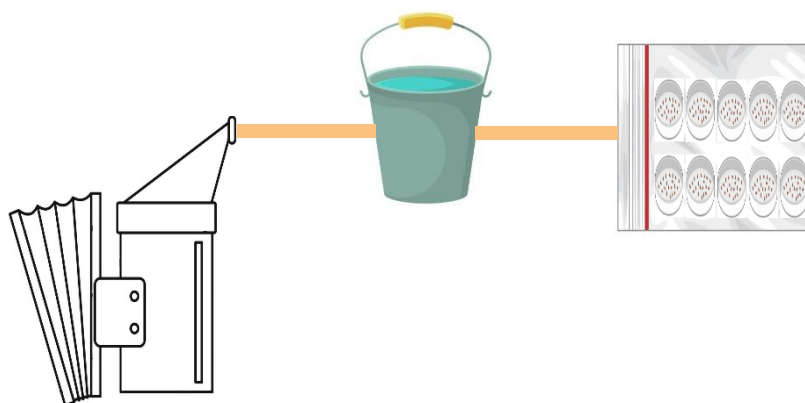


Figura 1. Esquema do equipamento montado para a produção de fumaça e aplicação nas réplicas.

Germinação – Após a aplicação dos tratamentos, as sementes foram colocadas para germinar em placas Petri com dois papéis filtro umedecidos com água destilada. As placas Petri com as sementes por espécie foram então organizadas em bandejas por réplicas e colocadas em diferentes câmaras de germinação para cada réplica em temperatura constante de 27 °C e fotoperíodo de 12/12h (ver Fichino et al., 2016). As observações foram realizadas a cada dois dias, durante 30 dias, para verificar o número de sementes germinadas em cada placa. As sementes foram consideradas germinadas quando a radícula e/ou cotilédones eram visíveis). Ao término dos experimentos, foram realizados testes de viabilidade com as sementes não germinadas, utilizando-se solução de tetrazólio 1% em temperatura constante de 35°C por 24

horas no escuro (adaptado de Lakon, 1949). As espécies de Fabaceae com dormência física (*Senna corifolia*, *Chamaecrista fagonioides*, *Mimosa kalunga* e *Mimosa leioccephala*) foram escarificadas mecanicamente com lixa nº 150 previamente ao teste de viabilidade para romper o tegumento permitindo a entrada da solução de tetrazólio na semente (Baskin et al., 2006; Baskin & Baskin, 2014). As sementes coradas de rosa foram consideradas viáveis, e o total de sementes viáveis no final do experimento se deu através da soma das sementes germinadas com as coradas não-germinadas.

1.4 Atributos de germinação

O tempo médio de germinação (TMG) e a sincronia (Z) foram calculados para cada espécie e cada tratamento. O tempo médio de germinação (TMG) foi calculado de acordo com Ranal e Santana (2006) e indica o tempo médio (dias) que as sementes de uma determinada espécie levou para germinar no intervalo de 30 dias.

A sincronia de germinação entre as sementes de uma mesma réplica foi definida através do quociente entre a soma das combinações parciais do número de sementes germinadas em cada réplica, a serem realizadas duas a duas entre todas as sementes germinadas ao final do experimento, se $Z = 1$, todas as sementes germinam ao mesmo tempo; se $Z = 0$, no mínimo, duas sementes germinam, uma de cada vez (Ranal et al., 2009; Ranal & Santana, 2006). A porcentagem de sementes viáveis indica a porcentagem de sementes viáveis de uma determinada espécie, resultado do quociente entre a soma do número de sementes germinadas e sementes coradas pelo número de sementes por placa. A porcentagem de sementes vazias indica a porcentagem de sementes vazias de uma determinada espécie após a aplicação do tetrazólio, resultado do quociente entre o número de sementes vazias e o total de sementes da placa. O peso das sementes foi calculado adaptado de Perez-Harguindeguy et al. (2013).

1.5 Índice de vigor das plântulas (IVP)

Para a analisar o IVP, foi realizado o tratamento com fumaça aerosol para as respectivas espécies: *Aristida riparia*, *Chromolaena maximilianii*, *Diplusodon punctatus*, *Dyckia brasiliana*, *Eriope glandulosa*, *Mimosa leioccephala*, *Sporobolus cubensis* e *Lepidaploa lilacina*. Posteriormente as sementes foram colocadas para germinar em câmaras de germinação, como descrito acima. Após 7 e 14 dias a partir da protrusão da radícula, o comprimento radicular e aéreo de cada plântula foram aferidos com um paquímetro digital

(Stainless Hardened). O IVP foi calculado de acordo com Dhindwal et al. (1991), como $IVP = [\text{comprimento aéreo (mm)} + \text{comprimento radicular (mm)}] \times \text{porcentagem de germinação}$.

1.6 Análises estatísticas

Comparações referentes à porcentagem de germinação entre tratamentos (fumaça e controle) e de acordo com a espécie foram testadas usando GLMM (Modelo linear generalizado misto) com distribuição binomial. As réplicas foram consideradas fatores aleatórios. Comparações entre os valores de TMG, Z, comprimento aéreo e radicular e o IVP de acordo com a espécie foram testadas usando GLMM (Modelo linear generalizado misto) com distribuição gaussiana. As espécies, a fumaça e controle foram considerados variáveis preditoras e MGT, Z, comprimentos e IVP a variável resposta. Todos os testes estatísticos foram realizados separadamente para cada espécie. Os testes estatísticos foram executados utilizando o pacote *multcomp*, *lme4* e *emmeans* do software R (Hothorn et al., 2008; R Development Core Team, 2013).

Para quantificar o efeito direto da fumaça na porcentagem de germinação, no tempo médio de germinação e na sincronia de acordo com o tipo de vegetação, forma de crescimento presente em cada vegetação e forma de crescimento, as espécies foram agrupadas. Calculou-se o *effect-size*, usando o índice Hedges'g e seu intervalo de confiança de 95% (Rosenthal, 1991). O Hedges'g é a diferença entre a média do tratamento e controle, dividido pelo desvio padrão e multiplicado pelo ajuste responsável por ajustar o tamanho do efeito para amostras pequenas.

3 RESULTADOS

3.1 Germinação

A fumaça influenciou na germinação de três das 37 espécies estudadas. *Comanthera bisulcata* e *Hyptis remota* apresentaram aumento da porcentagem de germinação quando expostas à fumaça, enquanto que *Eriope glandulosa* teve a porcentagem de germinação diminuída (Tab. 2). As demais espécies não tiveram suas porcentagens de germinação afetadas pela fumaça. No geral, não houve influência da exposição à fumaça na germinação das espécies em relação às formas de crescimento (Fig. 2). Entretanto, quando as espécies foram agrupadas de acordo com as formas de crescimento presentes em cada tipo de vegetação, a fumaça influenciou negativamente as graminóides de campo sujo (Fig. 2).

Tabela 2. Porcentagem de germinação (% , média±SE), tempo médio de germinação (TMG, média ±SE) e sincronia (média±SE) de 37 espécies de Cerrado. C = controle, FA = fumaça aerossol. *diferença significativa em relação ao controle onde, *P<=0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

Espécies	Família	Germinação (%)		TMG (dias)		Z	
		C	FA	C	FA	C	FA
<i>Aldama grandiflora</i>	Asteraceae	100±0	100±0	7.35±0.65	5.40±0.24*	0.417±0.08	0.62±0.13
<i>Aspilia foliacea</i>	Asteraceae	100±0	66.66±33.33	5.91±00.31	4.46±2.24	0.64±0.19	0.2±0.2
<i>Chromolaena cf horminoide</i>	Asteraceae	100±0	72.02±10.39	8.42±1.06	11.95±2.17	0.25±0.04	0.46±0.18
<i>Chromolaena maximiliani</i>	Asteraceae	55.72±7.1	50.06±3.99	5.76±0.53	4.82±0.21	0.51±0.07	0.50±0.11
<i>Eremanthus erythropappus</i>	Asteraceae	20±12.24	40±24.49	5.1±3.14	4.6±2.92	0±0	0±0
<i>Eremanthus sp.</i>	Asteraceae	40±15.15	46.66±22.6	6.25±2.13	6.75±2.65	0.5±0.28	0±0
<i>Lepidaploa lilacina</i>	Asteraceae	94.46±3.91	97±1.85	13.68±1.36	10.49±0.27*	0.13±0.04	0.16±0.02

<i>Dyckia brasiliana</i>	Bromeliaceae	100±0	100±0	6.60±0.39	9.28±0.52*	0.73±0.16	0.60±0.1
<i>Kielmeyera coriacea</i>	Calophyllaceae	100±0	100±0	9.56±0.52	11.57±0.49*	0.26±0.08	0.36±0.08
<i>Kielmeyera</i> sp. 1	Calophyllaceae	100±0	100±0	11.61±0.67	9.89±1.05	0.24±0.03	0.33±0.09
<i>Kielmeyera</i> sp. 2	Calophyllaceae	100±0	100±0	10.28±0.38	6.87±0.12***	0.23±0.02	0.41±0.05*
<i>Bulbostylis paradoxa</i>	Cyperaceae	94±6	60±24.49	14.61±1.45	10.90±4.55	0.19±0.07	0.13±0.06
<i>Comanthera bisulcata</i>	Eriocaulaceae	9.52±4.76	39.16±23.1***	12.33±6.48	13.55±7.04	0±0	0.04±0.04
<i>Comanthera elegans</i>	Eriocaulaceae	93.75±6.25	95.09±2.84	10.68±0.98	9.75±0.69	0.24±0.08	0.31±0.1
<i>Bauhinia dumosa</i>	Fabaceae	100±0	100±0	5.95±0.14	5.84±0.19	0.59±0.05	0.60±0.07
<i>Chamaecrista fagonioides</i>	Fabaceae	18.12±5.38	17.01±1.05	6.6±2.02	6.56±0.92	0.13±0.08	0.26±0.19
<i>Dalbergia miscolobium</i>	Fabaceae	90.41±3.62	85.64±8.33	6.69±0.13	4.88±0.14***	0.70±0.13	0.82±0.1
<i>Mimosa kalunga</i>	Fabaceae	40.44±5.14	43±9.66	11.8±1.5	8.7±1.58	0.15±0.07	0.01±0.01
<i>Mimosa leiocephala</i>	Fabaceae	15.91±4.8	19.22±4.32	6.66±2.57	12.27±2.44	0.29±0.18	0.27±0.19
<i>Senna corifolia</i>	Fabaceae	49.09±12.55	59.03±5.58	14.30±1.28	14.62±1	0.20±0.03	0.15±0.02
<i>Trimezia juncifolia</i>	Iridaceae	95.95±2.49	100±0	18.08±0.44	18.37±0.60	0.29±0.03	0.29±0.06
<i>Eriope filifolia</i>	Lamiaceae	57.51±8.62	83.34±4.11	6.05±0.26	4.77±0.17***	0.58±0.04	0.60±0.13
<i>Eriope glandulosa</i>	Lamiaceae	100±0	60±24.49*	6.46±0.78	4.46±1.84	0.68±0.13	0.13±0.13*
<i>Hyptis remota</i>	Lamiaceae	25.39±8.73	77.08±15.72*	20.55±2.93	18.41±2.98	0±0	0.02±0.02
<i>Medusantha mollissima</i>	Lamiaceae	87.5±12.5	77.77±11.52	9.52±0.9	8.80±1.01	0.17±0.09	0.27±0.18
<i>Diplusodon burchellii</i>	Lythraceae	60.64±18.39	63.65±17.32	16.01±4.01	14.65±3.89	0.13±0.09	0.07±0.03

<i>Diplusodon punctatus</i>	Lythraceae	84.33±6.74	100±0	17.76±1.72	14.29±0.98	0.2±0.2	0.23±0.12
<i>Microlicia rubra</i>	Melastomataceae	40±24.49	70±20	5.2±3.24	13.4±4	0.0±0	0.23±0.19
<i>Stenodon suberosus</i>	Melastomataceae	63.33±18.55	50±22.36	8.16±2.49	5.25±2.32	0.2±0.2	0.1±0.1
<i>Tibouchina melastomoides</i>	Melastomataceae	90.50±2.7	90.66±4.52	11.25±0.76	14.27±1.06*	0.21±0.04	0.25±0.05
<i>Aristida riparia</i>	Poaceae	92.28±4.21	91.18±3.36	7.27±0.55	9.65±1.01	0.31±0.02	0.30±0.07
<i>Loudetiopsis chrysothrix</i>	Poaceae	96.87±3.12	91.25±6.43	6.35±0.59	8.81±2.32	0.34±0.08	0.37±0.09
<i>Sporobolus cubensis</i>	Poaceae	100±0	100±0	9.50±3.04	9.28±2.85	0.40±0.02	0.33±0.06
<i>Vellozia aloifolia</i>	Velloziaceae	100±0	78.45±9.96	8.96±0.33	10.15±0.78	0.3±0.06	0.49±0.02
<i>Vellozia caruncularis</i>	Velloziaceae	100±0	100±0	5.4±0.87	8.46±1.88	0.29±0.04	0.85±0.15*
<i>Xyris hilariana</i>	Xyridaceae	62±7.69	45.71±20.89	12.76±1.58	9.9±4.13	0.24±0.19	0.12±0.09
<i>Xyris peregrina</i>	Xyridaceae	60±24.49	78.75±9.13	6.82±2.94	12.94±2.36	0.08±0.08	0.17±0.07

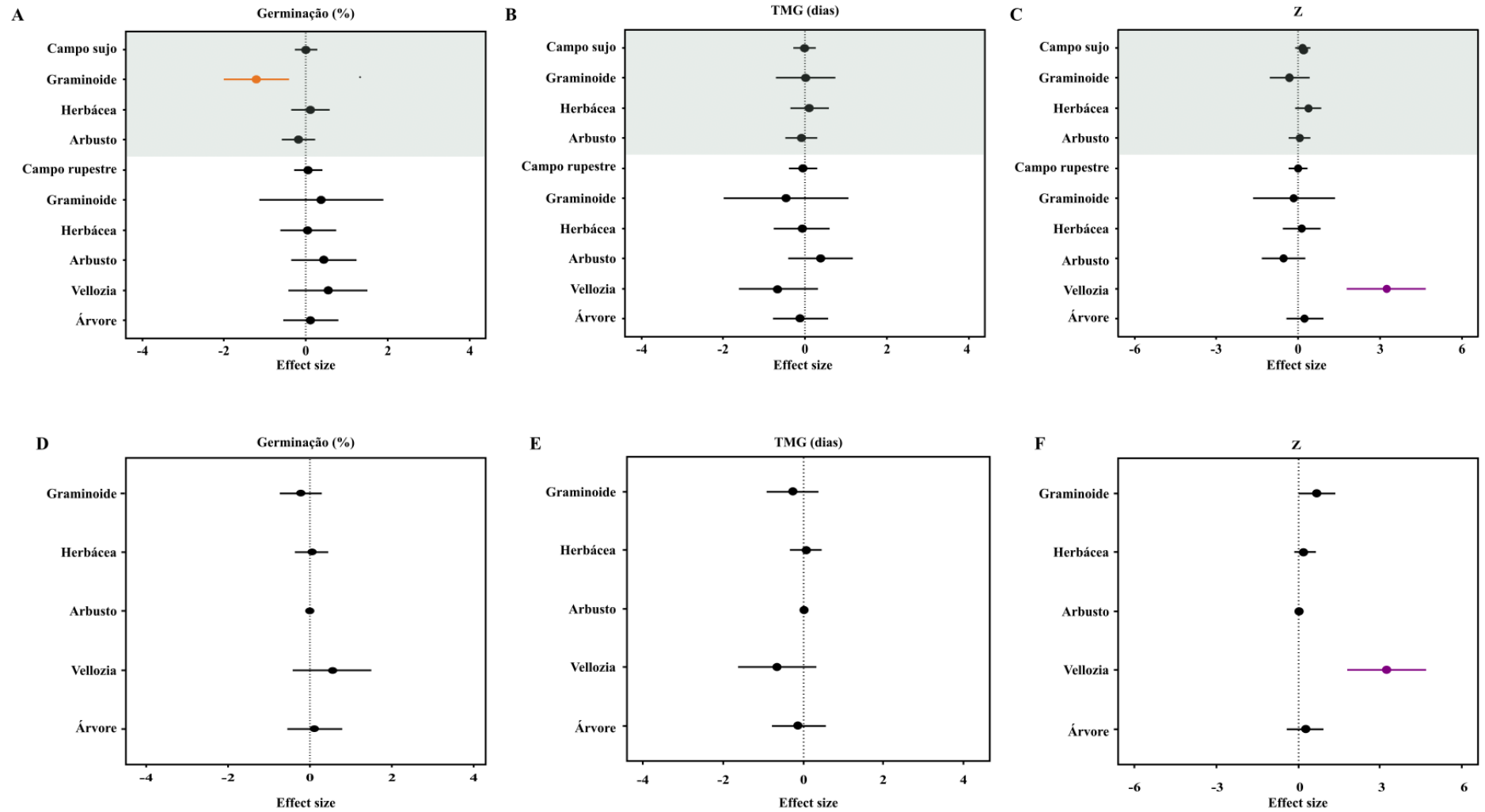


Figura 2. Efeito da fumaça na porcentagem de germinação (A,D), tempo médio de germinação (B,E) e sincronia de germinação (C,F) de espécies do Cerrado agrupadas por forma de crescimento no geral e tipo de vegetação, forma de crescimento presente em cada vegetação, respectivamente. Barra em cor representa o efeito. Valores positivos

indicam que a fumaça aumentou a porcentagem, tempo médio e sincronia de germinação e valores negativos indicam que a fumaça diminuiu a porcentagem, o tempo médio e a sincronia de germinação. Barra em preto indica que a fumaça não teve efeito. Os valores foram baseados no índice Hedges, 'g, (CI = 95%), obtidos através de sementes expostas à fumaça e do grupo controle.

1.7 3.2 Tempo médio de germinação (TMG) e Sincronia (Z)

A fumaça influenciou o tempo médio de germinação (TMG) em oito espécies, acelerando o tempo médio de germinação de *Aldama grandiflora*, *Lepidaploa lilacina*, *Kielmeyera* sp. 2, *Dalbergia miscolobium* e *Eriope filifolia* (Tab. 2); e atrasando a germinação de *Dyckia brasiliiana*, *Tibouchina melastomoides* e *Kielmeyera coriacea* quando expostas à fumaça (Tab. 2). As demais espécies não foram afetadas. Em relação à sincronia de germinação (Z), as sementes de *Kielmeyera* sp. 2 e *Vellozia carancularis* germinaram mais simultaneamente quando expostas à fumaça (Tab. 2). *Eriope glandulosa* apresentou uma diminuição na Z quando expostas à fumaça (Tab. 2). Entretanto, quando as espécies foram agrupadas de acordo com o tipo de vegetação e suas respectivas formas de crescimento, a fumaça não afetou o TMG (Fig. 2). Em relação a Z, quando as espécies foram agrupadas de acordo com o tipo de vegetação e suas respectivas formas de crescimento, a fumaça aumentou a sincronia de germinação para as Vellozias (Fig. 2).

3.3 Comprimento aéreo e radicular, Índice de vigor da plântula (IVP) e R:A.

Quando expostas à fumaça, somente as plântulas de *Sporobolus cubensis* ao 7º dia apresentaram maior comprimento aéreo, radicular e maior IVP em relação ao controle sem exposição (Fig. 3). Já as plântulas de *Chromolaena maximiliani* e *Mimosa leioccephala* apresentaram menor comprimento aéreo quando expostas à fumaça. Plântulas de *Chromolaena maximiliani* também apresentaram menor comprimento radicular e menor IVP quando exposta à fumaça (Fig. 3). As plântulas de *Dyckia brasiliiana* apresentaram IVP menor quando expostas à fumaça (Fig. 3).

Ao 14º dia, plântulas de *Dyckia brasiliiana* apresentaram menor parte aérea quando exposta à fumaça (Fig. 3). Em relação ao comprimento radicular, as plântulas de *Diplusodon punctatus* e *Dyckia brasiliiana* apresentaram raízes menores quando expostas à fumaça (Fig. 3). Entretanto, plântulas de *Mimosa leioccephala* aumentaram o investimento em raiz em resposta à fumaça (Fig. 3). No 14º dia, plântulas de *Aristida riparia* apresentaram aumento no IVP após aplicação da fumaça (Fig. 3). Já *Chromolaena maximiliani*, *Dyckia brasiliiana*, *Diplusodon punctatus* e *Mimosa leioccephala* diminuíram o IVP quando expostas à fumaça (Fig. 3). Em relação à alocação de biomassa, independentemente da idade da plântula, as espécies investiram mais na parte aérea do que na raiz (Fig. 3).

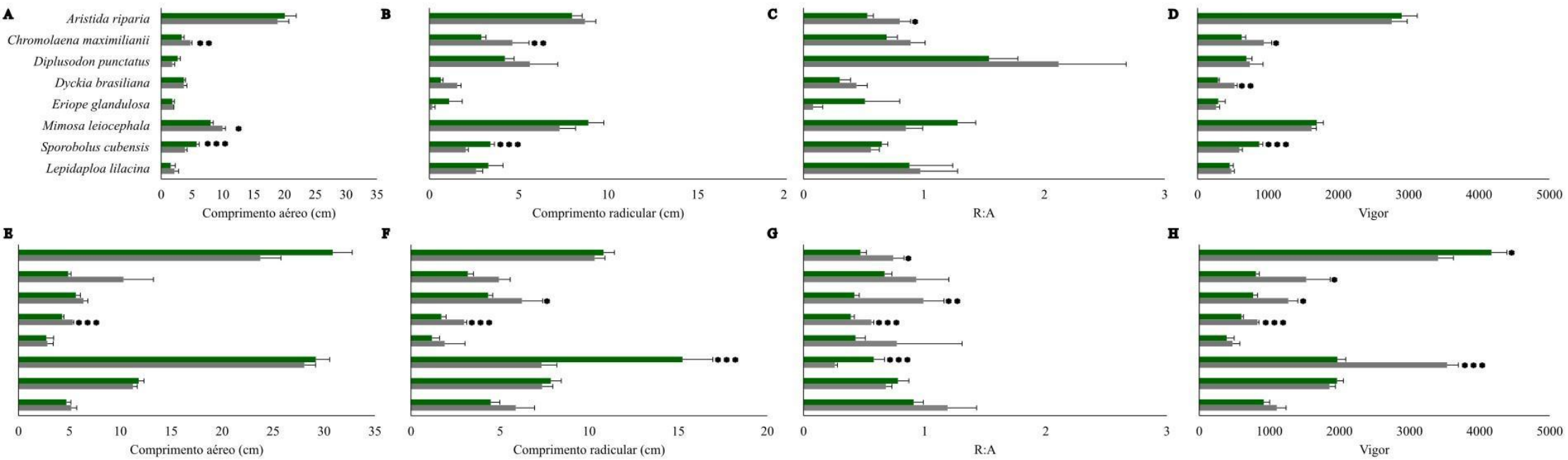


Figura 3. Efeito da fumaça no comprimento aéreo (cm) e radicular (cm), comprimento radicular:comprimento aéreo (R:A) e vigor após 7 dias a partir da protrusão da raiz (Médias $\pm$ SE) (A,B,C,D). Efeito da fumaça no comprimento aéreo (cm) e radicular (cm), R:A e vigor após 14 dias a partir da protrusão da raiz (Médias $\pm$ SE) (E, F, G, H). Barra em verde representa a fumaça aerosol e barra em cinza representa o controle. *diferença significativa em relação ao controle onde, * $P \leq 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

4 DISCUSSÃO

Espécies presentes em ecossistemas inflamáveis possuem diferentes estratégias de regeneração após a passagem do fogo: possuem sementes que podem resistir à altas temperaturas, sem influenciar na germinação; ou são estimuladas a germinar pelo fogo (Paula & Pausas, 2008; Fichino et al., 2016). O estímulo da germinação pela fumaça pode ser uma adaptação importante em ambientes susceptíveis ao fogo recorrente (Keeley et al., 2011), onde as porcentagens de germinação das espécies são aumentadas pela fumaça (Brown et al., 1993; Reyes & Trabaud, 2009; Moreira et al., 2010). Algumas das espécies estudadas mostraram respostas positivas quando expostas à fumaça: 5,4% das espécies germinaram mais, 13,5% das espécies germinaram mais rapidamente e 2,7% germinaram mais sincronicamente. No total, 12 espécies tiveram algum dos atributos de germinação influenciados pela fumaça.

De maneira geral, não houve efeito da fumaça na germinação da maioria das espécies estudadas. Outros estudos também não encontraram relação entre a fumaça e atributos de germinação para muitas espécies do Cerrado (Fichino et al., 2016; Ramos et al., 2019; Zironi et al., 2019). Porém o aumento da germinação após a exposição das sementes à combinação de choque térmico e fumaça foi observado para algumas espécies (Zironi et al., 2019a). Sendo assim, a combinação de fatores somados à fumaça, podem estimular a germinação das espécies de Cerrado (Zironi et al., 2019a; 2019b).

Nossos resultados também mostraram que a fumaça pode influenciar em diferentes estágios de vida da planta e que, o principal efeito da fumaça talvez não seja na porcentagem de germinação, mas sim no processo de estabelecimento da plântula (Sparg et al., 2005). Por exemplo, o vigor (IVP) da *Aristida riparia* e *Sporobolus cubensis* aumentou em resposta à fumaça, apesar da germinação destas espécies não ter sido influenciada pela fumaça. Em relação à alocação de biomassa, *Mimosa leioccephala* investiu mais na parte aérea em resposta à fumaça, proporcionando maior independência da plântula em relação às reservas da semente e a fixação de carbono (Wright & Westboy, 2000). Cada planta tem necessidades específicas nos diferentes estágios do seu ciclo de vida (Grubb, 1977). Entender o processo de germinação é fundamental para compreender como a espécie se regenera, permitindo o estabelecimento da plântula na comunidade (Jiménez-Alfaro et al., 2016).

Entretanto, além de considerar atributos de germinação, é necessário observar os atributos das plântulas para um maior entendimento da montagem da comunidade, mesmo porque os filtros ambientais influenciam na transição entre os estágios iniciais de vida do indivíduo (germinação, sobrevivência e crescimento da plântula), determinando a distribuição

dos indivíduos adultos na comunidade (Fraaije et al., 2015, Mondoni et al., 2015). Portanto, plântulas que possuem maior vigor, principalmente nesse estágio de vida tão sensível e crucial para o estabelecimento da planta, possuem vantagem em relação às espécies com menor vigor, com maiores chances de sobrevivência e passagem para fase adulta. Ou seja, o aumento do vigor em resposta à fumaça, implica em vantagem para a planta se desenvolver em vegetações onde o fogo ocorre.

Os resultados apresentados trazem importantes informações sobre a relação da fumaça aerossol com espécies do Cerrado. De acordo com os resultados obtidos, fica evidenciada a importância de analisar atributos de germinação e de plântula para entender o processo de montagem da comunidade. Destacam-se nos resultados efeitos positivos da fumaça na porcentagem, tempo médio, sincronia de germinação, comprimento aéreo e radicular e no vigor de algumas espécies, indicando que a fumaça tem efeito na regeneração da comunidade no geral, mas que a resposta à fumaça é espécie-específica, representando assim um importante passo para um melhor entendimento das estratégias de regeneração das espécies vegetais do Cerrado, auxiliando para a conservação do bioma.

Considerando que a concentração da fumaça e o tempo de exposição das sementes ao tratamento podem influenciar os resultados (Drewes et al., 1995; Keeley & Fotheringham, 1998; Van Staden et al., 2000), estudos complementares testando diferentes métodos, tempos e concentrações são necessários, para compreender as dinâmicas naturais da fumaça aerossol em queimadas em ambientes naturais, assim como sua aplicabilidade como técnicas para aprimorar o controle e otimizar resultados de germinação in-situ e ex-situ em diferentes cenários.

5 MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1. Caracterização das áreas de estudo. PNSC: Parque Nacional Serra do Cipó; PNSV: Parque Nacional das Sempre Vivas; EEI: Estação Ecológica de Itirapina; RNST: Reserva Natural Serra do Tombador.

Área de estudo	Tipo de Vegetação	Precipitação Média Anual (mm)	Temperatura Média (°C)	Extensão (ha)	Coordenada Geográfica
PNSC	Campo rupestre	1450	21	31.618	43°27'-43°27' O e 19°13'-19°32' S
PNSV	Campo rupestre/Campo cerrado	1137	19	124.155	43°27'-43°27' O e 19°13'-19°32' S
EEI	Campo sujo	1459	22	2300	47°51'-47°48' O e 22°11'-22°15' S
RNST	Campo sujo	1625	24	8900	47°15'-47°51' O e 13°35'-13°38' S

Tabela S2. Comprimento aéreo (cm) e radicular (cm), Raiz:Aéreo, Índice de vigor da plântula medidos após 7 a partir da protrusão da raiz (Média±SE). C= controle, FA = fumaça aerosol *diferença significativa em relação ao controle onde, *P<=0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

7º dia								
Espécies	Comprimento aéreo		Comprimento radicular		R:A		Vigor	
	C	FA	C	FA	C	FA	C	FA
<i>Aristida riparia</i>	18.89±1.84	20.05±1.87	8.70±0.61	7.97±0.57	0.8±0.09	0.53±0.05*	2760.47±220.29	2900.55±221.35

<i>Chromolaena maximiliani</i>	4.77±0.25	3.36±0.38**	4.64±0.93	2.91±0.26**	0.89±0.12	0.69±0.09	941.83±111.15	627.64±55.77*
<i>Diplusodon punctatus</i>	1.8±0.41	2.7±0.42	5.62±1.56	4.22±0.52	2.12±0.56	1.54±0.24	743.11±186.97	693.21±80.67
<i>Dyckia brasiliana</i>	3.69±0.5	2.26±0.27	1.56±0.21	0.64±0.13	0.44±0.09	0.3±0.09	525±39.8	290±19.07**
<i>Eriope glandulosa</i>	2.02±0.07	1.82±0.34	0.16±0.16	1.11±0.73	0.08±0.08	0.51±0.29	264±47.92	293.75±99.8
<i>Mimosa leiocephala</i>	9.69±0.47	8.05±0.4*	7.28±0.89	8.89±0.86	0.85±0.14	1.28±0.15	1620.24±69.17	1695±93.21
<i>Sporobolus cubensis</i>	3.88±0.34	5.77±0.41***	2.04±0.14	3.42±0.22***	0.56±0.07	0.65±0.05	593.19±43.75	877.56±49.73***

<i>Lepidaploa</i>	2.17±0.66	1.55±0.75	2.61±0.37	3.3±0.82	0.97±0.31	0.88±0.36	479±43.75	457.18±49.73
<i>lilacina</i>								

Tabela S3. Comprimento aéreo (cm) e radicular (cm), Raiz:Aéreo, Índice de vigor da plântula medidos após 14 a partir da protrusão da raiz (Média±SE). C= controle, FA = fumaça aerosol ***diferença significativa em relação ao controle onde, *P<=0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.**

Espécies	14º dia							
	Comprimento aéreo		Comprimento radicular		R:A		Vigor	
	C	FA	C	FA	C	FA	C	FA
<i>Aristida</i>	23.75±2.03	30.86±1.92	10.31±0.58	10.81±0.61	0.74±0.09	0.47±0.05*	3406.77±222.13	4168.11±220.97*
<i>riparia</i>								
<i>Chromolaena</i>	10.33±2.94	4.88±0.29	4.94±0.63	3.19±0.32	0.93±0.27	0.67±0.06	1527.91±341.14	808.45±49.78*
<i>maximiliani</i>								
<i>Diplusodon</i>	6.38±0.44	5.63±0.46	6.32±1.16	4.33±0.26*	0.99±0.17	0.42±0.04**	1271.80±134.69	796.9±61.11*
<i>punctatus</i>								
<i>Dyckia</i>	5.32±0.11	4.3±0.17***	2.98±0.15	1.71±0.26***	0.56±0.02	0.39±0.03***	830.78±22.71	602.3±28.49***
<i>brasiliiana</i>								

<i>Eriope</i> <i>glandulosa</i>	2.86±0.56	2.74±0.71	1.89±1.14	1.18±0.42	0.77±0.54	0.43±0.08	475.33±103.73	392.33±106.29
<i>Mimosa</i> <i>leiocephala</i>	28.07±1.11	29.2±1.36	7.33±0.86	15.24±1.71***	0.26±0.02	0.58±0.09***	3536.10±161.44	1972.16±119**
<i>Sporobolus</i> <i>cubensis</i>	11.25±0.41	11.81±0.52	7.33±0.6	7.85±0.59	0.68±0.05	0.78±0.09	1859.15±84.99	1966.98±90.24
<i>Lepidaploa</i> <i>lilacina</i>	5.19±0.54	4.71±0.44	5.88±1.06	4.48±0.51	1.19±0.24	0.91±0.08	1107.62±130.52	920.08±85.2

Tabela S4. Porcentagem de sementes vazias e viáveis por espécie (Média±SE). C= controle, FA = fumaça aerosol.

Espécies	Viáveis (%)		Vazias (%)	
	C	FA	C	FA
<i>Aldama grandiflora</i>	66.3±9.6	60.8±11.6	8.8±1.8	19.7±5.7
<i>Aspilia foliacea</i>	40±5.77	23.33±14.52	16.66±12.01	23.33±8.81
<i>Chromolaena cf horminoide</i>	51.4±2.5	36.9±5.4	28.6±2.6	30.1±4.8
<i>Chromolaena maximilianii</i>	64.6±6.6	50.06±3.1	34.08±7.1	39.55±5.74
<i>Eremanthus erythropappus</i>	7±4.3	3±2	90.1±4.4	95±2.2
<i>Eremanthus sp.</i>	13.5±4.9	11.3±5.5	71.6±6.6	86.3±6.9
<i>Lepidaploa lilacina</i>	46.6±6.6	59±6.4	47.3±6.7	41±6.4
<i>Dyckia brasiliana</i>	94.86±3.33	95±3.53	1.31±1.31	0±0
<i>Kielmeyera coriacea</i>	75.3±12.4	83.6±9.7	0±0	0±0
<i>Kielmeyera sp. 1.</i>	73.6±4.9	70±6.9	1.7±1.7	0±0
<i>Kielmeyera sp. 2</i>	100±0	98.3±1.7	0±0	0±0
<i>Bulbostylis paradoxa</i>	56±10.41	49.64±19.37	2±1.22	3±2
<i>Comanthera bisulcata</i>	35.6±0.6	47.1±11.5	0±0	0±0
<i>Comanthera elegans.</i>	52.6±5.2	70.4±10.6	0±0	0±0
<i>Bauhinia dumosa</i>	93.3±2.7	93.3±4.7	0.0±0.0	0±0
<i>Chamaecrista fagonioides</i>	68.65±6.37	68.79±2.73	0±0	0±0
<i>Dalbergia miscolobium</i>	86.7±4.6	91.5±4.2	0±0	0±0
<i>Mimosa kalunga</i>	88±7.34	72.5±7.82	0±0	4.5±2.78
<i>Mimosa leioccephala</i>	72.3±11	95.6±3.4	0±0	0±0
<i>Senna corifolia</i>	89.4±2.8	96.1±2.6	0±0	0±0
<i>Trimezia juncifolia</i>	94±4	94±4.	0±0	2±2
<i>Eriope filifolia</i>	57.5±8.6	83.2±4.1	25.4±9.4	6±3.7
<i>Eriope glandulosa</i>	31±5.09	15±7.87	48±4.89	53.69±6.83
<i>Hyptis remota</i>	63.3±3.3	50±5.77	23.3±6.7	23.33±6.66
<i>Medusantha mollissima</i>	60±8.2	70±9.12	20±9.12	27.5±8.53
<i>Diplusodon burchellii</i>	27.4±4.6	22.2±8.4	58.7±2.7	72±9.9

<i>Diplusodon punctatus</i>	14.9±3.5	28±7.5	66.1±6.3	71±7.6
<i>Microlicia rubra</i>	2.66±1.63	13.33±4.21	90.66±3.39	2.98±1.3
<i>Stenodon suberosus</i>	14.0±2.4	7.5±2.9	86±2.4	90.5±3.2
<i>Tibouchina melastomoides</i>	63.3±4.9	48±7.4	36.7±4.9	50±7
<i>Aristida riparia</i>	81.9±2.4	83.1±5.2	1.1±1.1	13.8±4.1
<i>Loudetiopsis chrysothrix</i>	51.1±7.1	62.3±10.8	27.3±3.1	15.9±8.1
<i>Sporobolus cubensis</i>	85.19±5.52	88±5.14	0±0	0±0
<i>Vellozia aloifolia</i>	87.5±2.4	79.2±8.7	0±0	2.1±2.1
<i>Vellozia caruncularis</i>	76±12.9	83.8±6.7	0±0	0±0
<i>Xyris hilariana</i>	30±4.7	27±4.1	0±0	0±0
<i>Xyris peregrina</i>	8.6±6.7	30.3±12.8	19.8±7.1	15.5±3

Tabela S5. Peso (Média±SE, mg) e forma (largura:comprimento) das sementes.

Espécies	Peso seco (mg)	Forma (mm)
<i>Aldama grandiflora</i>	4.67±0.35	0.27±0.008
<i>Aspilia foliacea</i>	n.a.	0.51±0.01
<i>Chromolaena cf horminoide</i>	0.98±0.051	n.a.
<i>Chromolaena maximilianii</i>	1.02±0.04	0.17±0.005
<i>Eremanthus erythropappus</i>	1.08±0.06	n.a.
<i>Eremanthus sp.</i>	0.72±0.04	n.a.
<i>Lepidaploa lilacina</i>	0.41±0.02	n.a.
<i>Dyckia brasiliana</i>	1.33±0.09	0.66±0.01
<i>Kielmeyera coriacea</i>	n.a.	n.a.
<i>Kielmeyera sp. 1</i>	27.86±1.2	0.56±0.01
<i>Kielmeyera sp. 2</i>	36.13±2.93	0.4±0.01
<i>Bulbostylis paradoxa</i>	1.47±0.04	0.71±0.01
<i>Comanthera bisulcata</i>	0.14±0.05	0.53±0.01
<i>Comanthera elegans</i>	n.a.	0.61±0.008
<i>Bauhinia dumosa</i>	59.99±0.99	0.84±0.01

<i>Chamaecrista fagonioides</i>	12.69±0.65	0.78±0.006
<i>Dalbergia miscolobium</i>	62.49±5.00	0.53±0.009
<i>Mimosa kalunga</i>	18.14±0.88	n.a.
<i>Mimosa leiocephala</i>	30.22±0.52	0.81±0.01
<i>Senna corifolia</i>	31.31±0.46	0.6±0.01
<i>Trimezia juncifolia</i>	5.09±0.12	0.77±0.01
<i>Eriope filifolia</i>	1.21±0.06	0.96±0.01
<i>Eriope glandulosa</i>	n.a.	n.a.
<i>Hyptis remota</i>	6.41±0.82	0.61±0.01
<i>Medusantha mollissima</i>	2.35±0.14	0.44±0.005
<i>Diplusodon burchellii</i>	0.55±0.03	0.79±0.01
<i>Diplusodon punctatus</i>	n.a.	0.79±0.01
<i>Microlicia rubra</i>	0.34±0.02	n.a.
<i>Stenodon suberosus</i>	0.19±0.01	n.a.
<i>Tibouchina melastomoides</i>	1.07±0.14	0.75±0.01
<i>Aristida riparia</i>	n.a.	0.08±0.001
<i>Loudetiopsis chrysothrix</i>	n.a.	n.a.
<i>Sporobolus cubensis</i>	2.11±0.05	0.71±
<i>Vellozia aloifolia</i>	n.a.	n.a.
<i>Vellozia caruncularis</i>	n.a.	n.a.
<i>Xyris hilariana</i>	n.a.	n.a.
<i>Xyris peregrina</i>	0.54±0.06	n.a.

O peso para *Medusantha mollissima*, *Tibouchina melastomoides* e *Comanthera bisulcata* foi obtido a partir de um mínimo de 10 sementes por réplica.

CONTRIBUIÇÃO DAS AUTORAS: Todas as autoras contribuíram para o desenho experimental e coletaram dados; Raquel G. Martins analisou os dados. Todas as autoras discutiram as implicações dos resultados. Raquel G. Martins escreveu o primeiro rascunho do manuscrito, e todas as autoras contribuíram com o melhoramento do manuscrito.

AGRADECIMENTOS: Agradecemos aos membros do LEVeg (Laboratório de Ecologia da

Vegetação).

INFORMAÇÕES DO FINANCIAMENTO: Esse estudo foi financiado pela FAPESP. RGM recebeu bolsa da FAPESP (2020/07731-4), HLZ recebeu bolsa FAPESP (2020/15891-1). AF recebeu bolsa de produtividade CNPq (312689/2021-7). Este estudo foi financiado pela FAPESP Seed Corn (2019/09903-0).

REFERÊNCIAS

Ab' Saber, N.A. (1977) Os Domínios morfoclimáticos da América do Sul. Primeira Aproximação. *Geomorfologia*, 52, 1-21.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., de Moraes, J.L.G & Sparovek, G. (2013) Köppen's climate classification map for Brasil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22, 711–728.

Antonelli-Filho, R. (2011) Plano de Manejo da Reserva Natural Serra do Tombador, Cavalcante, Goiás.

Baskin, C.C., Thompson, K. & Baskin, J.M. (2006) Mistakes in germination ecology and how to avoid them. *Seed Science Research*, 16, 165–168.

Baskin, C.C. & Baskin, J.M. (2014) *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press, New York, NY, US.

BFG (Brazilian Flora Group), (2018) Brazilian flora 2020: Innovation and collaboration to meet target 1 of the global strategy for plant conservation (GSPC), 69, 1513-1527.

Bond, W.J. & van Wilgen, B.W. (1996) *Fire and Plants (population and community biology series 14)*. Berlin. Springer.

Brown, N.A. (1993) Promotion of germination of fynbos seeds by plant-derived smoke. *New Phytologist*, 123, 575-583.

Cao, D., Schöttner, M., Halitschke, R., Li, D., Baldwin, G., Rocha, C. & Baldwin, I. T. (2021) Syringaldehyde is a novel smoke-derived germination cue for the native fire-chasing tobacco, *Nicotiana attenuata*, *Seed Science Research*, 31, 292–299.

Carthey, A.J.R., Tims, A., Geedicke, I. & Leishman, M.R. (2018) BROADSCALE PATTERNS IN SMOKE-RESPONSIVE GERMINATION FROM THE SOUTHEASTERN AUSTRALIAN FLORA. *Journal of Vegetation Science*, 29, 737-745.

Çatav, Ş. S., Küçükakyüz, K., Akbaş, K. & Tavşanoğlu, Ç. (2014) Smoke-enhanced seed germination in Mediterranean Lamiaceae, *Seed Science Research*, 24, 257–264.

Çatav, Ş. S., Küçükakyüz, K., Taysanoglu, Ç. & Pausas, J.G. (2018) Effect of fire-derived chemicals on germination and seedling growth in Mediterranean plant species. *Basic and*

Applied Ecology, 30, 65-75.

Coutinho, L.M. (1982) Ecological Effects of Fire in Brazilian Cerrado. In: Huntley, B.J., Walker, B.H. (Eds) Ecology of Tropical Savannas. Ecological Studies, vol 42. Springer, Berlin, Heidelberg.

Coutinho, L.M. (1990) Fire in the Ecology of the Brazilian Cerrado. In: Goldammer, J.G. (eds) Fire in the Tropical Biota. Ecological Studies, Vol 84. Springer, Berlin, Heidelberg.

Crosti, R., Ladd, P.G., Dixon, K.W. & Piotto, B. (2006) Post-fire germination: The effect of smoke on seeds of selected species from the central Mediterranean basin. Forest Ecology and Management, 221, 306-312.

Dayamba, S.D., Savadogo, P., Zida, D., Sawadogo, L., Tiveau, D. & Oden, P.C. (2010) Fire temperature and residence time during dry season burning in a Sudanian savanna-woodland of West Africa with implication for seed germination. Journal of Forestry Research, 21, 445-450.

Dhindwal, A.S., Lather, B.P.S. & Singh, J. (1991) Efficacy of seed treatment on germination, seedling emergence and vigour of cotton (*Gossypium hirsutum*) genotypes. Seed Research, 19, 59-61.

Dixon, K.W., Roche, S. & Pate, J.S. (1995) The promotive effect of smoke derived from burnt native vegetation on seed germination of Western Australian plants. Oecologia, 101, 185-192.

Donohue, K., Casas, K.K., Burghart, L., Kovach, L.K. & Willis, C.G. (2010) Germination, post germination adaptation, and species ecological ranges. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics, 41, 293-319.

Drewes, F.E., Smith, M.T. & Van Staden, J. (1995) The effect of a plant-derived smoke extract on the germination of light-sensitive lettuce seed. Plant Growth Regulation, 16, 205-209.

Eiten, G. (1972) The cerrado vegetation of Brazil. Botanical Review, 38, 201-341.

Fernandes, G.W., Arantes-Garcia, L., Barbosa, M., Barbosa, N.P.U.B, Batista, E.K.L., Beirozet al (2020) Biodiversity and ecosystem services in the Campo Rupestre: A road map for the sustainability of the hottest Brazilian biodiversity hotspot. Perspectives in Ecology and Conservation, 18, 213-222.

Fichino, B.S., Dombroski, J.R.G., Pivello, V.R. & Fidelis, A. (2016) Does Fire Trigger Seed Germination in the Neotropical Savannas? Experimental Tests with Six Cerrado Species. Biotropica, 48, 181-187.

Fidelis, A., Blanco, C.C., Müller, S.C., Pillar, V.D. & Pfadenhauer, J. (2012) Short-term changes caused by fire and mowing in Brazilian Campos grasslands with different long-term fire histories. Journal of Vegetation Science, 23, 552-562.

Figueira, J.E.C., Ribeiro, K.T., Ribeiro, M.C., Jacobi, C.M., França, H. A.C. de O, Conceição, A.A. et al. (2016) Fire in Rupestrian Grasslands: Plant Response and Management. In: Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. In: Fernandes, G. (Ed) Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil. Springer, Cham.

Flematti, G.R., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W. & Trengove, R.D. (2004) A compound from smoke that promotes seed germination. *Science*, 305, 977.

Flematti, G.R., Merritt, D.J, Piggott, M.J., Trengove, R.D., Smith, S.M., Dixon, K.W. et al. Burning vegetation produces cyanohydrins that liberate cyanide and stimulate seed germination. *Nature Communications*, 2, 360.

Fraaije, R.G.A., ter Braak, C.J.F., Verduyn, B., Breeman, L.B.S., Verhoeven, J.T.A. & Soons, M.B. (2015) Early plant recruitment stages set the template for the development of vegetation patterns along a hydrological gradient. *Functional Ecology*, 29, 971–980.

Ghebrehiwot, H.M., Kulkarni, M.G., Kirkman, K.P. & Van Staden, J. (2009) Smoke Solutions and Temperature Influence the Germination and Seedling Growth of South African Mesic Grassland Species. *Rangeland Ecology & Management*, 62, 572-578.

Grubb, P.J. (1977) The maintenance of species-richness in plant communities: The importance of the regeneration niche. *Biological Reviews*, 52, 107-14.

Hoffmann, W. (1996) The effects of fire and cover on seedling establishment in a neotropical savanna. *Journal of Ecology*, 84, 383-393.

Hothorn, T., Bretz, F. & Westfall, P. (2008) Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, 50, 346-363.

Jiménez-Alfaro, B., Fernando, A.O.S., Fidelis, A., Poschold, P. & Commander, L. (2016) Seed germination traits can contribute better to plant community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 27, 637-645.

Keeley, J.E. & Fotheringham, C.J. (1998) Mechanism of smoke-induced seed germination in a post-fire chaparral annual. *Journal of Ecology*, 86, 27-36.

Keeley, J.E. & Pausas, J.G. (2018) Evolution of ‘smoke’ induced seed germination in pyroendemic plants. *South African Journal of Botany*, 115, 251-255.

Keeley, J.E., Pausas, J.G., Rundel, P.W., Bond, W.J. & Bradstock, R.A. (2011) Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. *Trends Plant Science*, 16, 406-411.

Knox, K.J.E. & Clarke, P.J. (2006) Fire season and intensity affect shrub recruitment in temperate sclerophyllous woodlands. *Oecologia* 149, 730–739.

Kulkarni, M.G., Light, M.E. & Van Staden, J. (2011) *South African Journal of Botany*, 77, 972-979.

Lakon, G. (1949) The topographical tetrazolium method for determining the germinating capacity of seeds. *Plant Physiology*, 24, 389-394.

Le Stradic, S., Buisson, E., Fernandes, G.W., & Morellato, L.P.C. (2018) Reproductive phenology of two cooccurring Neotropical mountain grasslands. *Journal of Vegetation Science* 29, 15-24.

- Mondoni, A., Pedrini, S., Bernareggi, G., Rossi, G., Abeli, T., Probert, R.J. et al. (2015) Climate warming could increase recruitment success in glacier foreland plants. *Annals of Botany*, 116, 907–916.
- Myers, N., Mittermeyer, R.A., Mittermeyer, C.G., Fonseca, G. A. & Kent, J. (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 853-858.
- Moreira, B., Tormo, J., Estrelles, E. & Pausas, J.G. (2010) Disentangling the role of heat and smoke as germination cues in Mediterranean Basin flora. *Annals of Botany*, 105, 627-635.
- Oliveira, R.S., Galvão, H.C., de Campos, M.C.R., Eller, C.B., Pearse, S.J. & Lambers, H. (2015) Mineral nutrition of campos rupestres plant species on contrasting nutrient-impooverished soil types. *New phytologist*, 205, 1183-1194.
- Oliveira-Filho, A. & Ratter, J. (2002) Vegetation Physiognomies and Woody Flora of the Cerrado Biome. In: Oliveira, P. & Marquis, R. Ed. *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna*. New York Chichester, West Sussex: Columbia University Press, pp. 91-120.
- Overbeck, G.E., Muller, S.C. & Pillar, V.D.P. (2005) Fine-scale post-fire dynamics in southern Brazilian subtropical grassland. *Journal of Vegetation Science*, 16, 655-664.
- Paula, S. & Pausas, J.G. (2008) Burning seeds: Germinative response to heat treatments in relation to resprouting ability. *Journal of Ecology*, 96, 543-552.
- Patwardhan, P.R., Brown, R.C. & Shanks, B.H. (2011) Product distribution from the fast pyrolysis of hemicellulose. *ChemSusChem*, 4, 636-643.
- Pérez-Harguindeguy, N., Díaz, S., Garnier, E., Lavorel, S. , Poorter, H. , Jaureguiberry P. et al. (2016) Corrigendum to: New handbook for standardised measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 64, 715-716.
- Pilon, N.A.L., Cava, M.G.B., Hoffmann, W.A., Abreu, R.C.R., Fidelis, A. & Durigan G (2021) The diversity of post-fire regeneration strategies in the cerrado ground layer. *Journal of Ecology* 109, 154–166.
- R Core Team. (2015) *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
- Ramos, D.M., Valls, J.F.M, Borghetti, F. & Ooi, M.M.J. (2019) Fire cues trigger germination and stimulate seedling growth of grass species from Brazilian savannas. *American Journal of Botany*, 106, 1190-1201.
- Ranal, M.A. & Santana, D. (2006) How and why to measure the germination process? *Revista Brasileira de Botânica*, 29, 1-11.
- Ranal, M. A. (2009) Calculating germination measurements and organizing spreadsheets. *Revista Brasileira de Botânica*, 32, 849-855, 2009.

Reyes, O. & Trabaud, L. (2009) Germination behaviour of 14 mediterranean species in relation to fire factors: smoke and heat. *Plant Ecology*, 202, 113-121, 2009.

Ribeiro, J. F. & Walter, B. M. T. (1998) Fitofisionomias do bioma Cerrado. Embrapa Cerrados-Capítulo em livro científico (ALICE).

Rosenthal, R. & Rubin, D.B. (1991). Further issues in effect size estimation for one-sample multiple-choice-type data. *Psychological Bulletin*, 109, 351–352.

Sanchez, L. G. F., Dantas-Junior, A. B., Porto, A. C. C. Q., Musso, C., Sato, M. N. & Miranda, H. S. (2022) From germination to seedling development: the effects of smoke on a native and an invasive grass species of the Cerrado. *Seed Science Research*, 32, 78–85.

Silveira, F.A.O., Negreiros, D., Newton, P.U.B, Buisson, E., Carmo, F.F., Carstensen, D.W. et al. (2016) Ecology and evolution of plant diversity in the endangered campo rupestre: a neglected conservation priority. *Plant and Soil*, 403, 129-152.

Simon, M F. & Pennington, T. (2012) Evidence for adaptation to fire regimes in the tropical savannas of the Brazilian Cerrado. *International Journal of Plant Sciences*, 173, 711-723.

Simon, M.F., Grether, R & Queiroz, L.P. (2009) Recent assembly of the Cerrado, a neotropical plant diversity hotspot, by in situ evolution of adaptations to fire. *Proceedings of the National Academy of Science*, 106, 20359-20364.

Stanley, D., Rejzek, M., Naested, H., Smedley, M., Otero, S., Fahy, B. et al (2011) The role of α -glucosidase in germinating barley grains. *Plant Physiology*, 155, 932–943.

Van Staden, J & Brown, N.A.C. (2000) Smoke as a germination cue. *Plant Species Biology*, 5, 167-178.

Whelan, R. J. (1995) The ecology of fire. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Wright, I. J. & Westoby, M. (2000) Cross-species relationships between seed- 486 ling relative growth rate, nitrogen productivity and root vs leaf function 487 in 28 Australian woody species. *Functional Ecology* 14, 97–107.

Yearsley, E.M., Fowler, W.M. & He, T. (2018) Does smoke water enhance seedling fitness of serotinous species in fire-prone southwestern Western Australia? *South African Journal of Botany*, 115, 237-243.

Zirondi, H.L., Silveira, F.A.O. & Fidelis, A. (2019a) Fire effects on seed germination: heat shock and smoke on permeable vs impermeable seed coats. *Flora*, 253, 98-106.

Zirondi, H.L., José, H.P., Daibes & L.F. & Fidelis, A. (2019b) Heat and smoke affect the germination on flammable resprouters: *Vellozia* species in the Cerrado. *Folia GeoBotanica*, 54, 65-75.

Zupo, T., Daibes, L.F., Pausas, J.G. & Fidelis, A. (2021) Post-fire regeneration strategies in a frequently burned Cerrado community. *Journal of Vegetation Science* 32, 1–11.

A fumaça aerossol influencia no desenvolvimento de plântulas de espécies do Cerrado?

Raquel G. Martins¹, Heloiza L. Zirondi¹, Fidelis, A.¹

¹Lab of Vegetation Ecology, Departamento de Biodiversidade, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, Brasil.

Resumo

A germinação e o estágio de plântula são fases cruciais e determinantes para o estabelecimento do indivíduo no ambiente, sendo influenciados pelos e dependem muito dos filtros ambientais. Em ambientes inflamáveis, a fumaça pode ser um dos filtros ambientais que afeta no desenvolvimento da plântula. Diante disso, observamos se a fumaça influencia no desenvolvimento de três espécies nativas do Cerrado: *Dyckia brasiliiana*, *Mimosa leioccephala* e *Sporobolus cubensis*. Para isso, foi aplicado fumaça aerossol nas plântulas com XX dias após a germinação. Foram medidos peso seco e comprimento das partes aéreas e subterrâneas das plântulas após 1, 3, 6 e 9 meses a partir da aplicação da fumaça. As medidas das plântulas de *Sporobolus. cubensis* foram realizadas apenas após 1 e 3 meses. A fumaça não afetou o comprimento e peso das espécies estudadas no primeiro e nono mês. Após 3 meses da aplicação da fumaça, somente as plântulas de *Sporobolus cubensis* apresentaram raízes, comprimentos e pesos aéreo e radicular menores em relação ao controle. Enquanto que resultados de 6 meses após o tratamento mostraram que apenas as plântulas de *Dyckia brasiliiana* apresentaram maior peso aéreo quando expostas à fumaça. Concluimos que, de modo geral, não houve efeito positivo da fumaça no desenvolvimento de plântulas de espécies do Cerrado e que a fumaça pode atuar em diferentes processos importantes para a sobrevivência e desenvolvimento do indivíduo

Palavras-chave: Cerrado, atributos de plântula, fumaça aerossol.

1. Introdução

Plântula é a fase do ciclo de vida da planta, a qual abrange desde a emergência da radícula até o aparecimento de folhas suficientes para tornar a planta independente da energia armazenada (Nelson e Larson 1984). A fase pós germinação é determinante para o estabelecimento do indivíduo no ambiente, pois é nessa etapa que ocorre a extrusão da radícula, ancorando a plântula ao solo, seguida pelo surgimento da plúmula, que cresce em direção à luz (Fenner e Thompson 2005). Na transição entre os estágios iniciais de vida da planta, os filtros ambientais desempenham um papel crucial e determinam a distribuição dos indivíduos adultos na comunidade vegetal (Fraaije et al. 2015; Mondoni et al. 2015). Diante disso, entender quais e como esses fatores podem influenciar no desenvolvimento da plântula é de extrema relevância para entender a montagem da comunidade vegetal.

Em ambientes susceptíveis ao fogo, a fumaça pode ser um dos fatores que influencia no desenvolvimento das plântulas (Gebrehiwot et al. 2009, Ramos et al. 2019, Sanchez et al. 2022). Além de influenciar na germinação em diversas famílias (Dixon et al. 1995; Crosti et al. 2005; Dayamba et al. 2010; Moreira et al. 2010; Çatav et al., 2014a, b; Carthey et al. 2018) a fumaça pode ser responsável pelo aumento do vigor da plântula (Sparg et al. 2005; Gebrehiwot et al. 2009; Kulkarni et al. 2012; Martins et al. in prep) e maior investimento de biomassa na raiz (Ramos et al. 2019; Sanchez et al. 2022), propiciando vantagem no estabelecimento em relação às espécies não responsivas à fumaça (Ghebrehiwot et al. 2009, 2012). Plântulas mais vigorosas e com sistema radicular mais robusto em resposta à fumaça, possuem maiores chances de sucesso no estabelecimento em vegetações onde o fogo ocorre. Sendo assim, compreender quais respostas das plantas garantem sucesso na regeneração em um determinado ecossistema, é um passo importante para o desenvolvimento de estratégias eficazes de restauração que promovam a resiliência e persistência da comunidade ao longo do tempo.

Portanto, neste estudo visamos investigar o efeito da fumaça aerossol no desenvolvimento da plântula de espécies do Cerrado, avaliando o comprimento e alocação da biomassa aérea e subterrânea após a aplicação da fumaça. Sendo assim, testamos a seguinte hipótese: a fumaça irá aumentar o investimento de biomassa aéreo e subterrâneo e no comprimento aéreo e subterrâneo das plântulas, pois compostos químicos presentes na fumaça influenciam no desenvolvimento da plântula, originando indivíduos com sistemas aéreo e radicular mais robustos (Daws et al. 2007; Sparg et al. 2006; Kulkarni et al. 2007 a,b; Ghebehiwot et al. 2008; Zhou et al. 2011; Elsadek & Yousef 2019).

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

Sementes de três espécies nativas do Cerrado de diferentes formas de crescimento (gramínea, herbácea e arbustiva, Tab. 1) foram coletadas em áreas de campo sujo na Reserva Nacional Serra do Tombador (RNST, 13° 35'–38' S, 47° 45'–51' W, Centro-Oeste do Brasil). Após a coleta, as sementes foram colocadas em sacos de papel. No laboratório, as sementes foram armazenadas em sala refrigerada ~16°C por 2 meses.

O campo sujo é composto predominantemente por um estrato herbáceo contínuo e rico em espécies, dominado por gramíneas C4, com a presença de arbustos e pequenas árvores distribuídos de forma esparsa (Coutinho 1982). O campo sujo está geralmente associado a solos rasos com a presença de pequenos afloramentos rochosos ou em alguns casos associados a solos profundos, mas pouco férteis (Oliveira-Filho 2013). A vegetação herbácea contínua com predominância de espécies graminóides proporciona uma alta intensidade e frequência de fogo, com intervalo de 1 a 3 anos de retorno do fogo (Eiten 1972).

Tabela 1 Espécies estudadas de acordo com a família e forma de crescimento. Presença de dormência (ND: não dormente; PY: dormência física; PD: dormência fisiológica). Resposta da porcentagem de germinação à fumaça e a altas temperaturas quando os tratamentos foram aplicados na semente (SR: sem resposta; RP: resposta positiva).

Espécie	Família	Forma de crescimento	Dormência	Fumaça	Altas T°C
<i>Sporobolus cubensis</i> Hitchc.	Poaceae	Graminóide	PD	SR	RP
<i>Dyckia brasiliiana</i> L.B.Sm.	Bromeliaceae	Herbácea	ND	SR	RP
<i>Mimosa leioccephala</i> Benth.	Fabaceae	Arbusto	PY	SR	RP

2.2 Fumaça aerossol

Foram semeadas 80 sementes de cada espécie em bandejas de mudas. As sementes do arbusto *Mimosa leioccephala* (Fabaceae) foram escarificadas mecanicamente com lixa nº 150 previamente para quebrar a dormência física, rompendo o tegumento permitindo a entrada de água na semente (Baskin, Thompson & Baskin 2006; Baskin e Baskin 2014). Para observar o

efeito da fumaça aerossol nas plântulas, após 7 dias da protrusão da raiz de cada semente, 41 plântulas de cada espécie foram expostas à fumaça aerossol. O experimento de fumaça foi realizado utilizando um fumigador onde foram queimadas 20 gramas de biomassa composta por gramíneas e herbáceas nativas de campo sujo da RNST para cada réplica (5 réplicas com 1 plântulas por réplica) evitando-se a pseudo replicação. Durante a queima da biomassa, a fumaça é transportada até as plântulas por meio de um cano de pvc passando por um balde de água, a fim de ocasionar o resfriamento da mesma, evitando assim também o efeito da temperatura nas plântulas (Fig. 1A). Na extremidade final do cano está localizado um saco plástico vedado (50x60) contendo as bandejas de mudas com as espécies, onde as mesmas ficaram expostas por 10 minutos à fumaça. As plântulas usadas como controle não foram expostas à fumaça. Posterior a 30 dias da aplicação do tratamento, as plântulas foram transplantadas para tubos de pvc (80 x 10) a fim de não sofrerem por restrição de espaço (Fig. 1B). Foi utilizado como substrato areia e terra vegetal (2:1) em casa de vegetação com irrigação por aspersores (3 x ao dia por 5').

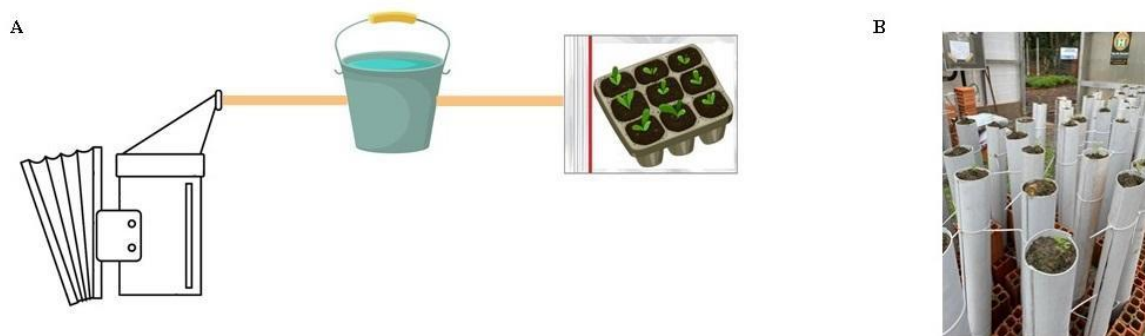


Figura 1. Esquema do equipamento montado para a produção de fumaça e aplicação nas réplicas (A); Plântulas transplantadas para canos de PVC após 7 dias da protrusão radicular (B)

2.3 Medição de atributos da plântula

Foram medidos peso seco e comprimento das partes aéreas e subterrâneas das plântulas de *Mimosa leioccephala* e *Dyckia brasiliana* após 1, 3, 6 e 9 meses a partir da aplicação da fumaça. As medidas das plântulas de *Sporobolus cubensis* foram realizadas apenas após 1 e 3 meses, devido à elevada mortalidade das mudas. Em cada período, no mínimo 5 plântulas de cada espécie (até 7 plântulas/espécie) foram removidas do cano e lavadas cuidadosamente com água corrente para retirar o substrato. As plântulas foram cortadas abaixo do cotilédone, no início do sistema radicular a fim de separar a parte aérea da subterrânea. Ambas as partes tiveram o comprimento aferido com auxílio de um paquímetro e fita métrica, posteriormente

foram colocadas em estufa a 80° por 48h para obtenção da massa seca da parte aérea e radicular (precisão de 0,0001g). Para o grupo controle, a obtenção das medidas seguiu o mesmo protocolo descrito acima.

2.4 Análises estatísticas

Comparações entre os valores de comprimento aéreo e radicular, peso aéreo e radicular R:A de acordo com a espécie foram testadas usando GLMM (Modelo linear generalizado misto) com distribuição gaussiana. As réplicas foram consideradas fatores aleatórios. As espécies, a fumaça e controle foram considerados variáveis preditoras e comprimento aéreo e radicular, peso aéreo e radicular as variáveis respostas. Todos os testes estatísticos foram realizados separadamente para cada espécie e para cada tempo. Os testes estatísticos foram executados utilizando o pacote *multcomp*, *lme4* e *emmeans* do software R (Hothorn et al. 2008; R Development Core Team 2013).

3. Resultados

A fumaça não afetou o comprimento (aéreo e subterrâneo) e nem o peso (aéreo e subterrâneo) das espécies estudadas no primeiro e nono mês (Tab. 2). Os resultados mostraram que três meses após a exposição à fumaça, somente as plântulas de *Sporobolus cubensis* apresentaram comprimento (aéreo e subterrâneo) e peso (aéreo e subterrâneo) menores em relação ao controle (Tab. 2). Enquanto que resultados de seis meses após o tratamento mostraram que apenas as plântulas de *Dyckia brasiliiana* apresentaram maior peso aéreo quando expostas à fumaça (Tab. 2).

Em relação à proporção entre a parte aérea e subterrânea, as plântulas de *Mimosa leioccephala* no início do desenvolvimento investem mais na biomassa aérea em resposta à fumaça, enquanto que no controle, o investimento é maior na biomassa subterrânea. Ao longo do tempo, os tratamentos não influenciam mais no investimento aéreo e subterrâneo durante o estabelecimento da espécie. Já para as plântulas de *Dyckia brasiliiana*, majoritariamente o investimento é na biomassa aérea, independente do tratamento, porém entre 3 e 6 meses, há maior investimento em comprimento na biomassa subterrânea.

Tabela 2. Peso seco radicular (g) e aéreo (g), comprimento radicular (cm) e aéreo (cm) da plântula medidos após 7 dias a partir da protrusão da raiz (Média±SE). C= controle, FA = fumaça aerossol *diferença significativa em relação ao controle onde, *P<=0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.

Espécies	Idade (meses)	Peso radicular		Peso aéreo		Comprimento radicular		Comprimento aéreo	
		C	FA	C	FA	C	FA	C	FA
<i>Sporobolus cubensis</i>	1	2.21±0.39	2.21±0.4	4.98±0.59	4.83±0.69	3.58±0.95	3.25±0.68	1.46±0.12	1.33±0.09
	3	4.91±0.72	2.58±0.24*	9.9±1.34	5.4±0.87*	8.19±0.88	3.52±0.21**	3.65±0.31	1.86±0.24***
<i>Mimosa leioccephala</i>	1	8.88±1.44	7.11±0.99	37.73±5.02	35.91±0.91	6.51±0.42	4.18±0.46	4.78±0.19	4.63±0.2
	3	17.42±2.63	7.26±0.64	46.28±11.19	49.55±12.78	8.05±0.97	6.63±0.71	7.3±0.7	7.73±0.67
	6	346.73±72.55	374.67±77.96	1244.76±355.7	1072.84±270.75	25.5±4.17	24.33±2.18	42.6±6.45	35.88±4.25
	9	6574.17±1520	6540.4±1504	32400±612	22510.03±510	34.6±3.94	29±3.49	72.2±7.74	54.55±6.6
<i>Dyckia brasiliiana</i>	1	0.05±0.03	0.18±0.04	1.46±0.26	1.78±0.37	0.17±0.03	0.32±0.06	0.54±0.04	0.5±0.05
	3	0.16±0.08	0.33±0.02	2.28±0.25	2.53±0.26	0.78±0.22	0.9±0.14	0.42±0.07	0.55±0.04
	6	0.37±0.12	0.67±0.22	4.61±0.51	7±0.85*	12.35±2.5	12.94±2.48	7.72±0.35	8.54±0.72
	9	0.91±0.7	1.42±0.6	9.42±1.2	20.1±4.18	20.09±4.17	12.97±1.41	9.83±2.06	11.97±0.73

Tabela 3. Proporção entre o peso seco (g) da parte aérea e subterrânea e proporção entre o comprimento (cm) subterrânea e aérea (Média±SE). C= controle, FA = fumaça aerossol ***diferença significativa em relação ao controle onde, *P<0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001.**

Espécies	Idade (meses)	S:A (g)		S:A (cm)	
		C	FA	C	FA
<i>Sporobolus cubensis</i>	1	0.43+-0.03	0.47+-0.05	2.43+-0.67	2.35+-0.42
	3	0.49+-0.01	0.52+-0.08	2.29+-0.27	2.01+-0.23
<i>Mimosa leioccephala</i>	1	0.23+-0.01	0.19+-0.02	1.38+-0.13	0.92+-0.13*
	3	0.4+-0.04	0.17+-0.02**	1.13+-0.15	0.86+-0.08
	6	0.36+-0.07	0.44+-0.08	0.64+-0.09	0.71+-0.07
	9	0.08 +-0.02	0.06 +-0.01	0.51 +-0.05	0.53 +-0.01
<i>Dyckia brasiliiana</i>	1	0.02+-0.01	0.11+-0.02**	0.31+-0.05	0.65+-0.13*
	3	0.07+-0.03	0.13+-0.01	1.89+-0.37	1.62+-0.2
	6	0.07+-0.01	0.09+-0.03	1.53+-0.29	1.49+-0.26
	9	0.32 +-0.02	0.57 +-0.15	0.51 +-0.05	0.53 +-0.01

4. Discussão

O efeito positivo da fumaça no desenvolvimento de plântulas já foi demonstrado para muitas espécies de ambientes adaptados ao fogo (Gebrehiwot et al. 2009, Moreira et al., 2010, Ramos et al. 2019, Sanchez et al. 2022). Dentre as espécies estudadas, os resultados mostraram que três meses após a exposição à fumaça, somente as plântulas de *Sporobolus cubensis* apresentaram plântulas menores e mais leves em relação ao controle. Enquanto que resultados de seis meses após o tratamento mostraram que apenas as plântulas de *Dyckia brasiliiana* apresentaram maior peso aéreo quando expostas à fumaça. A fumaça não afetou o comprimento (aéreo e subterrâneo) e nem o peso (aéreo e subterrâneo) das espécies estudadas no primeiro e nono mês. Em relação a alocação de biomassa, a fumaça estimulou maior investimento de biomassa na parte aérea em plântulas de *Mimosa leioccephala* somente no começo do desenvolvimento. Para as plântulas de *Dyckia brasiliiana*, os tratamentos não influenciaram na alocação de biomassa no começo do desenvolvimento, porém entre 3 e 6 meses, houve maior investimento em comprimento na biomassa subterrânea em resposta à fumaça.

No geral, observamos que a fumaça aplicada na plântula jovem não influenciou o desenvolvimento da maioria das espécies. Entretanto, quando a fumaça foi aplicada na semente, vimos que atributos de germinação, atributos da plântula e o vigor foram influenciados (Martins

et al. em preparação). Por exemplo, sementes de *Sporobolus cubensis* expostas à fumaça não tiveram a germinação influenciada pelo tratamento, mas originaram plântulas com maior vigor em relação ao controle (Martins et al. in prep.). Entretanto, quando a fumaça foi aplicada na plântula da espécie de gramínea, a fumaça influenciou negativamente o desenvolvimento da espécie até o terceiro mês.

Maior investimento em comprimento na biomassa subterrânea pode ser vantajoso em uma vegetação onde as espécies graminoides são dominantes e a competição por espaço entre as raízes é muito alta, principalmente nos primeiros 10cm abaixo do solo (Wakeling et al. 2015). Portanto, as espécies que tem maior alocação no comprimento subterrâneo, conseguem ter vantagem nessa competição em vegetações majoritariamente compostas por gramíneas. Além disso, quanto mais robusto o sistema subterrâneo é, mais preparadas para persistir no sistema após a passagem do fogo as espécies estão

Entender a relação de atributos funcionais com a fumaça é crucial para compreender o processo de regeneração pós-queima no Cerrado. Os filtros ambientais exercem um papel muito importante nos estágios iniciais de vida da planta, determinando a distribuição das espécies na comunidade vegetal (Fraaije et al. 2015; Mondoni et al. 2015). Portanto, analisar as respostas dos atributos de germinação e dos atributos da plântula aos filtros ambientais é imprescindível para compreender como se dá o processo de montagem da comunidade vegetal (Leck et al. 2008; Donohue et al. 2010), além de trazer informações importantes para restauração e conservação do bioma.

Informações suplementares

Agradecimentos Agradecemos aos membros do LEVeg (Laboratório de Ecologia da Vegetação) envolvidos no experimento. Agradecemos também aos funcionários do Jardim Experimental e da Manutenção e aos técnicos Naiara David e Luis Fernando Bonatti.

Contribuição das autoras Todas as autoras contribuíram para o desenho experimental. RGM realizou os experimentos, coletou e analisou os dados. Todas as autoras discutiram as implicações dos resultados. RGM escreveu o primeiro rascunho do manuscrito, e todas as autoras contribuíram com o melhoramento do manuscrito.

Financiamento RGM recebeu bolsa da FAPESP (2020/07731-4), HLZ recebeu bolsa FAPESP (2020/15891-1). AF recebeu bolsa de produtividade CNPq (312689/2021-7). Este estudo foi financiado pela FAPESP Seed Corn (2019/09903-0).

Referências

Baskin CC, Thompson K & Baskin JM (2006) Mistakes in germination ecology and how to avoid them. *Seed Science Research*, 16:165–168. [https://doi.org/ 10.1079/SSR2006247](https://doi.org/10.1079/SSR2006247)

Baskin, C.C. & Baskin, J.M. (2014) *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Academic Press, New York, NY, US.

Coutinho LM (1990) Fire in the ecology of Brazilian cerrado. In: J. G. Goldammer (ed) *Fire in the Tropical Biota – Ecosystem Processes and Global Challenges*. Springer, Verlag, Berlim, pp 82-105

Carthey AJR, Tims A, Geedicke I. & Leishman MR (2018) Broad-scale patterns in smoke-responsive germination from the southeastern Australian flora. *Journal of Vegetation Science*, 29: 737-745. <https://doi.org/10.1111/jvs.12657>

Crosti R, Ladd PG, Dixon KW & Piotto B (2006) Post-fire germination: The effect of smoke on seeds of selected species from the central Mediterranean basin. *Forest Ecology and Management*, 221: 306-312. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.10.005>

Çatav ŞS, Küçükakyüz K, Akba K & Tavşanoğlu Ç (2014) Smoke-enhanced seed germination in Mediterranean Lamiaceae, *Seed Science Research*, 24: 257–264. <https://doi.org/10.1017/S0960258514000142>

Çatav, Ş. S., Küçükakyüz, K., Taysanoglu, Ç. & Pausas, J.G. (2018) Effect of fire-derived chemicals on germination and seedling growth in Mediterranean plant species. *Basic and Applied Ecology*, 30: 65-75. [https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.05.005)

Dayamba SD, Savadogo P, Zida D, Sawadogo L, Tiveau D & Oden PC (2010) Fire temperature and residence time during dry season burning in a Sudanian savanna-woodland of West Africa with implication for seed germination. *Journal of Forestry Research*, 21:445-450. <https://doi.org/10.1007/s11676-010-0095-y>

Daws MI, Davies J, Pritchard HW et al. (2007) Butenolide from plant-derived smoke enhances germination and seedling growth of arable weed species. *Plant Growth Regul* 51:73–82. <https://doi.org/10.1007/s10725-006-9149-8>

Dixon KW, Roche S & Pate JS (1995) The promotive effect of smoke derived from burnt native vegetation on seed germination of Western Australian plants. *Oecologia*, 101:185-192. <https://doi.org/10.1007/BF00317282>

Eiten, G. (1972) The cerrado vegetation of Brazil. *Botanical Review*, 38:201-341.

Elsadek MA & Yousef EAA (2019) Smoke-Water Enhances Germination and Seedling Growth of Four Horticultural Crops. *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants8040104>

Fenner, M & Thompson K (2005). *The ecology of seeds*. Cambridge university press.

Fraaije RGA, ter Braak CJF, Verduyn B, Breeman LBS, Verhoeven JTA, Soons MB (2015) Early plant recruitment stages set the template for the development of vegetation patterns along a hydrological gradient. *Funct Ecol* 29:971–980. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12441>

Ghebrehewot HM, Kulkarni MG, Kirkman KP & Van Staden J (2009) Smoke Solutions and Temperature Influence the Germination and Seedling Growth of South African Mesic Grassland Species. *Rangeland Ecology & Management*, 62:572-578. <https://doi.org/10.2111/08-246.1>

Hothorn T, Bretz F & Westfall P (2008) Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, 50:346-363. <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>

Kulkarni MG, Ascough GD & Van Staden J (2007). Effects of Foliar Applications of Smoke-Water and a Smoke-isolated Butenolide on Seedling Growth of Okra and Tomato. *HortScience* 42: 179-182. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.1.179>

Kulkarni MG, Ghebrehewot HM, Kirkman KP & Van Staden J (2012) Response of Grass Seedlings to Smoke-Water and Smoke-Derived Butenolide in the Absence of Macronutrients (Nitrogen, Phosphorus, and Potassium). *Rangeland Ecology & Management*, 65:31-38. <https://doi.org/10.2111/REM-D-11-00062.1>

Mondoni A, Pedrini S, Bernareggi G, Rossi G, Abeli T, Probert RJ et al. (2015) Climate warming could increase recruitment success in glacier foreland plants. *Annals of Botany*, 116:907–916. <https://doi.org/10.1093/aob/mcv101>

Moreira B, Tormo J, Estrelles E & Pausas JG (2010) Disentangling the role of heat and smoke as germination cues in Mediterranean Basin flora. *Annals of Botany*, 105: 627-635. <https://doi.org/10.1093/aob/mcq017>

Nelson CJ, Larson KL (1984) Seedling growth. *Physiological Basis of Crop Growth and Development* 93-129. <https://doi.org/10.2135/1984.physiologicalbasis.c4>

Oliveira-Filho A & Ratter J (2002) Vegetation Physiognomies and Woody Flora of the Cerrado Biome. In: Oliveira, P. & Marquis, R. Ed. *The Cerrados of Brazil: Ecology and Natural History of a Neotropical Savanna*. New York Chichester, West Sussex: Columbia University Press, pp. 91-120.

R Core Team. (2015) *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.

Ramos DM, Valls JFM, Borghetti F & Ooi MMJ (2019) Fire cues trigger germination and stimulate seedling growth of grass species from Brazilian savannas. *American Journal of Botany*, 106:1190-1201. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1345>

Sanchez LGF, Dantas-Junior AB, Porto ACCQ, Musso C, Sato MN & Miranda HS (2022)

From germination to seedling development: the effects of smoke on a native and an invasive grass species of the Cerrado. *Seed Science Research*, 32:78–85. <https://doi.org/10.1017/S0960258522000137>

Sparg SG, Kulkarni MG, Light ME & Van Staden J. (2005) Improving seedling vigour of indigenous medicinal plants with smoke. *Bioresource Technology*, 96:1323–1330. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.11.015>.

Sparg S, Kulkarni M, Van Staden J (2006) Aerosol smoke and smoke-water stimulation of seedling vigor of a commercial maize cultivar. *Crop Sci*, 46:1336–1340. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.07-0324>

Wakeling J, Bond W, Ghau M & February E (2015). Grass competition and the savanna-grassland ‘treeline’: A question of root gaps? *South African Journal of Botany*, 101:91–97. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2014.09.007>

Zhou J, Van Staden J, Guo L, Huang L (2011) Smoke-water improves shoot growth and indigo accumulation in shoots of *Isatis indigotica* seedlings. *S Afr J Bot* 77:787–789. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2011.02.004>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Compreender a relação de atributos funcionais com a fumaça é de extrema importância para entender como a comunidade vegetal se mantém ao longo do tempo na presença do fogo no Cerrado. Os atributos nos trazem informações sobre as interações das espécies com o seu ambiente e até mesmo com as outras espécies, indicando como essas interações influenciam a montagem da comunidade e o funcionamento do ecossistema (Jiménez-Alfaro et al., 2016). Por isso, construir um conhecimento básico da relação dos efeitos da fumaça nas plantas é fundamental para subsidiar estratégias eficazes de restauração que promovam a resiliência e persistência da comunidade ao longo do tempo.

Nossos resultados mostraram que a fumaça pode influenciar em diferentes estágios de vida da planta. Por exemplo, o vigor (IVP) da *Aristida riparia* e *Sporobolus cubensis* aumentou em resposta à fumaça, apesar da germinação destas espécies não ter sido influenciada pela fumaça. Também observamos que o efeito da fumaça pode variar de acordo com o estágio de vida em que a espécie é exposta à fumaça. O desenvolvimento inicial (até três meses) da plântula de *Sporobolus cubensis* foi afetado negativamente quando a plântula foi exposta à fumaça. Entretanto, no capítulo 1 as sementes da mesma espécie de gramínea foram expostas à fumaça e originaram plântulas mais vigorosas. Ou seja, a gramínea estudada teve respostas diferentes de acordo com a fase de vida em que foi exposta à fumaça, mostrando o quão complexo os efeitos da fumaça são nas espécies de Cerrado

Por fim, concluímos que para as espécies do Cerrado estudadas, a fumaça pode influenciar em diferentes estágios de vida da planta e que, a fase da vida em que a planta é exposta à fumaça também influencia na resposta da espécie em relação à fumaça. Somado a isso, evidenciamos a importância de observar para além dos atributos de germinação: analisar os atributos das plântulas também é importante para melhor entender o processo de montagem da comunidade vegetal. Os filtros ambientais influenciam na transição entre os estágios iniciais de vida do indivíduo (germinação, sobrevivência e crescimento da plântula), determinando a distribuição dos indivíduos adultos na comunidade (Fraaije et al., 2015, Mondoni et al., 2015), representando assim um importante passo para um melhor entendimento das estratégias de regeneração das espécies vegetais do Cerrado, auxiliando para a conservação do bioma.

REFERÊNCIAS

Fraaije, R.G.A., ter Braak, C.J.F., Verduyn, B., Breeman, L.B.S., Verhoeven, J.T.A. & Soons, M.B. (2015) Early plant recruitment stages set the template for the development of vegetation patterns along a hydrological gradient. *Functional Ecology*, 29, 971–980.

Jiménez-Alfaro, B., Fernando, A.O.S., Fidelis, A., Poschold, P. & Commander, L. (2016) Seed germination traits can contribute better to plant community ecology. *Journal of Vegetation Science*, 27, 637-645.

Mondoni, A., Pedrini, S., Bernareggi, G., Rossi, G., Abeli, T., Probert, R.J. et al. (2015) Climate warming could increase recruitment success in glacier foreland plants. *Annals of Botany*, 116, 907–916