

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo deste trabalho será disponibilizado somente a partir de 25/03/2027.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**

**Faculdade de Ciências e Letras - Câmpus de Assis**

**GABRIEL SCHMIDT TEIXEIRA MOTTA**

**O EFEITO DO ARMAZENAMENTO, DA FUMAÇA E SEUS COMPOSTOS  
ISOLADOS NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES DO CERRADO**

**ASSIS**

**2025**

**GABRIEL SCHMIDT TEIXEIRA MOTTA**

**O EFEITO DO ARMAZENAMENTO, DA FUMAÇA E SEUS COMPOSTOS  
ISOLADOS NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES DO CERRADO**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista  
(UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Assis,  
para obtenção do título de Doutor em Biociências

Área de Concentração: Caracterização e Aplicação  
da Diversidade Biológica

Orientador(a): Profa. Dra.

Rosana Marta Kolb

Bolsista: Coordenação de Aperfeiçoamento de  
Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) -  
Código de Financiamento 001

**ASSIS**

**2025**

M921e Motta, Gabriel Schmidt Teixeira  
O efeito do armazenamento, da fumaça e seus compostos isolados na germinação de espécies do Cerrado / Gabriel Schmidt Teixeira Motta. -- Assis, 2025  
166 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Letras, Assis  
Orientadora: Rosana Marta Kolb

1. Sementes germinação. 2. Sementes armazenamento. 3. Ecofisiologia vegetal. 4. Ecologia Cerrado. 5. Fumaça e compostos químicos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Assis



**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE GABRIEL SCHMIDT TEIXEIRA MOTA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOCIÊNCIAS, DA FACULDADE DE CIÊNCIAS E LETRAS - CÂMPUS DE ASSIS.**

Aos 25 dias do mês de março do ano de 2025, às 8h30min, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de TESE DE DOUTORADO de GABRIEL SCHMIDT TEIXEIRA MOTA, intitulada **O EFEITO DO ARMAZENAMENTO, DA FUMAÇA E SEUS COMPOSTOS ISOLADOS NA GERMINAÇÃO DE ESPÉCIES DO CERRADO**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. ROSANA MARTA KOLB (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) UNESP/FCL-Assis, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> TALITA MARQUES ZUPO (Participação Virtual) do(a) Instituto Tecnológico Vale - ITV - Belém/PA, Prof. Dr. LUÍS FELIPE DAIBES DE ANDRADE (Participação Virtual) do(a) UNESP/IB-Rio Claro, Prof. Dr. JONATHAN WESLEY FERREIRA RIBEIRO (Participação Virtual) do(a) UNESP/FCAV - Jaboticabal, Prof. Dr. BRUNO MOREIRA (Participação Virtual) do(a) CSIC-UV-Generalitat Valenciana - Moncada, Valencia, España. Após a exposição pelo doutorando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Profa. Dra. ROSANA MARTA KOLB

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a excelente orientação da Profa. Dra. Rosana Marta Kolb, que durante o Mestrado e o Doutorado me proporcionou todo suporte necessário e valiosos aprendizados que levarei para vida toda.

À Dra. Natashi Pilon, à Dra. Mariana Dairiel, à Dra. Talita Zupo, ao Dr. Jonathan Ribeiro, ao Dr. Luís Daibes e ao Dr. Bruno Moreira, por aceitarem compor a banca avaliadora durante a qualificação e defesa, por suas sugestões e críticas que foram de grande valia para a lapidação deste trabalho. E à Dra. Desirée Ramos, à Dra. Ana Oliveira, e ao Dr. Luiz Pinheiro, por gentilmente se prontificarem a participar como suplentes, meu muito obrigado. Agradeço também à Dra. Alessandra Fidelis, pelo envio de sementes e identificação de espécies.

Aos amigos da UNESP e do LAFEP: Rafael, Pedro, Rosani, Marcio, Renan, Isabella, Ariane e Daniela, por todo apoio, na coleta e nas triagens de sementes. Ao Dr. Raphael Garrido pela ajuda com as diluições micro molares dos compostos isolados. A Vanessa e ao Dr. Gleison Desidério pela ajuda com as fotografias microscópicas das sementes. Aos funcionários da UNESP, Allan, Caetano, Gisele, Lino, Marcos, Moisés e Sivaldo. Aos funcionários da Estação Ecológica de Assis e da Estação Ecológica de Santa Bárbara, Adriano, Mello e Marcos, minha sincera gratidão.

À minha família pelo apoio incondicional, em especial minha avó Amelia e meus pais Cibele e Elias que foram essenciais na minha formação. À minha namorada Geovanna por todo seu suporte, amor, carinho e paciência durante o momento de construção dessa tese, seu apoio foi fundamental.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Em ambientes propensos a distúrbios de fogo, a fumaça é um dos subprodutos gerados com capacidade de estimular a germinação de sementes. No entanto, seu efeito para espécies do Cerrado, ainda é pouco estudado, frente a grande riqueza de espécies. No Capítulo I, avaliamos o efeito da fumaça na germinação de 42 espécies de campo rupestre, campo úmido e savana, constatando que apenas algumas espécies respondem à fumaça. No Capítulo II, investigamos o efeito da fumaça, armazenamento e sua interação sobre a germinação de 36 espécies, tanto de campo úmido quanto de savana. Observamos que algumas espécies podem responder exclusivamente à fumaça ou ao armazenamento, além de apresentar resultados favorecidos com a interação entre os dois fatores. No Capítulo III, avaliamos o efeito da fumaça em diferentes lotes de sementes, e o efeito de três compostos isolados da fumaça (hidroquinona, cariquina e mandelonitrila) sobre a germinação de espécies de Cerrado. Encontramos que o efeito da fumaça pode variar de acordo com o lote de sementes, e que algumas espécies respondem aos compostos, mas não a fumaça em si. Além disso, todos os três compostos são capazes de estimular a germinação das espécies, embora a hidroquinona possa ser prejudicial em altas concentrações. Os tratamentos testados mostraram eficácia em favorecer a germinação de algumas espécies, podendo nestes casos ser aplicados em projetos de restauração ecológica.

**Palavras-chaves:** Fogo, Ecofisiologia de Sementes, Água de Fumaça, Sementes Armazenamento, Compostos Isolados da Fumaça.

## **ABSTRACT**

In environments characterized by frequent fire disturbances, smoke has been identified as a seed germination stimulant. However, the impact of smoke on species native to the Cerrado biome remains under-explored, primarily due to the vast diversity of species within this ecosystem. In Chapter I, an evaluation was conducted of the effect of smoke on the germination of 42 species from rupestrian fields, wet grasslands, and savannas. In Chapter II, the investigation was conducted into the effect of smoke, storage, and their interaction on 36 species from wet grasslands and savannas. We observed that some species can respond exclusively to smoke or storage, as well as showing favorable results with the interaction between the two factors. In Chapter III, we evaluated the effect of smoke on different batches of seeds, and the effect of three compounds isolated from smoke (hydroquinone, karrikin 1, and mandelonitrile) on the germination of Cerrado species. We found that the effect of smoke can vary according to the batch of seeds, and that some species respond to the compounds, but not to the smoke itself. Furthermore, all three compounds tested were found to stimulate germination, although high concentrations of hydroquinone exhibited potential toxicity. The treatments tested were effective in promoting the germination of some species and could be applied in ecological restoration projects.

**Keywords:** Fire, Seed Ecophysiology, Smoke Water, Seed Storage, Smoke Isolated Compounds.



## SUMÁRIO

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>                                                                        | <b>7</b>   |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                                                             | <b>13</b>  |
| <b>CAPÍTULO 1. Plantas do Cerrado têm germinação pouco favorecida pela fumaça .....</b>              | <b>20</b>  |
| <b>Introdução .....</b>                                                                              | <b>22</b>  |
| <b>Material e Métodos .....</b>                                                                      | <b>24</b>  |
| <b>Resultados .....</b>                                                                              | <b>37</b>  |
| <b>Discussão .....</b>                                                                               | <b>42</b>  |
| <b>Referências .....</b>                                                                             | <b>47</b>  |
| <b>Material Suplementar .....</b>                                                                    | <b>55</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2. Interação entre fumaça e armazenamento na germinação de espécies do Cerrado .....</b> | <b>65</b>  |
| <b>Introdução .....</b>                                                                              | <b>67</b>  |
| <b>Material e Métodos .....</b>                                                                      | <b>69</b>  |
| <b>Resultados .....</b>                                                                              | <b>73</b>  |
| <b>Discussão .....</b>                                                                               | <b>92</b>  |
| <b>Referências .....</b>                                                                             | <b>95</b>  |
| <b>Material suplementar .....</b>                                                                    | <b>101</b> |
| <b>CAPÍTULO 3. Effect of smoke-derived compounds on the germination of Cerrado species .....</b>     | <b>119</b> |
| <b>Introduction .....</b>                                                                            | <b>121</b> |
| <b>Material and Methods .....</b>                                                                    | <b>124</b> |
| <b>Results .....</b>                                                                                 | <b>127</b> |
| <b>Discussion .....</b>                                                                              | <b>135</b> |
| <b>Conclusion .....</b>                                                                              | <b>138</b> |
| <b>References .....</b>                                                                              | <b>139</b> |
| <b>Supplementary material .....</b>                                                                  | <b>145</b> |
| <b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>                                                                         | <b>166</b> |

## INTRODUÇÃO GERAL

### **Ecossistemas abertos e adaptações ao fogo**

O fogo integra os ecossistemas terrestres há cerca de 400 milhões de anos, e seu surgimento está estreitamente associado a evolução das plantas, devido ao aumento na concentração de oxigênio atmosférico e ao acúmulo de biomassa combustível, ambos essenciais para ocorrência de fogo (SCOTT, 2000; PAUSAS & KEELEY, 2009). Naturalmente, os raios são a principal fonte de ignição do fogo (KOMAREK, 1972; RAMOS NETO & PIVELLO, 2000). Contudo, ele também pode ser iniciado por atividade vulcânica, faíscas decorrentes de quedas de rochas (BATCHELDER, 1967), por meio da combustão espontânea, devido ao acúmulo de calor gerado pela atividade microbiana (SCOTT, 2000), ou até mesmo pelo impacto de meteoritos (JONES & LIM, 2000).

Ambientes propensos ao fogo estão distribuídos globalmente, incluindo tanto ecossistemas abertos quanto florestais (ARCHIBOLD, 1995). Em biomas tropicais abertos como campos e savanas, o fogo desempenha papel crucial na manutenção da estrutura e diversidade de espécies, promovendo a existência de gramíneas adaptadas ao fogo e limitando a expansão de espécies arbóreas (PARR et al. 2014). Por serem biomas não florestais, esses ecossistemas são frequentemente classificados, erroneamente, como ambientes degradados e acabam sendo negligenciados por políticas de preservação, porém, ecossistemas abertos são antigos e naturais, apresentando alta riqueza de espécies (VELDMAN et al. 2015).

Diferentes comunidades vegetais apresentam adaptações a distintos regimes de fogo, que variam de acordo com o ambiente e o tipo de vegetação dominante (KEELEY et al. 2011; BOND & WILGEN, 1996). Espécies vegetais que foram submetidas ao fogo durante seu ciclo de vida podem desenvolver traços adaptativos relacionados a esse

fator, desde que tenham surgido após a exposição ao fogo (LAMONT & HE, 2017). Essas adaptações começaram a se desenvolver há cerca de 110 milhões de anos, e incluem capacidade de rebrota, estímulo da floração, liberação de sementes e estímulo da germinação (LAMONT et al. 2018).

### **Resposta das sementes aos componentes químicos da fumaça**

Em ambientes pós-fogo a regeneração da vegetação por meio de sementes pode ser mediada por fatores químicos e físicos (KEELEY & FOTHERINGHAM, 2000). Entre os fatores físicos, destaca-se a temperatura, capaz de acelerar a maturação do embrião em espécies com sementes permeáveis, ou rompendo a camada do tegumento em espécies com sementes impermeáveis (BASKIN & BASKIN, 2014). As primeiras evidências de produtos químicos estimulantes gerados pelo fogo surgiram em espécies do Chaparral, onde a madeira carbonizada foi capaz de promover a germinação (WICKLOW, 1977; KEELEY et al. 1985; KEELEY & PIZZORNO, 1986). Posteriormente, na região dos Fynbos, na África do Sul, foi relatado que a fumaça derivada da queima de material vegetal também promovia a germinação (DE LANGE & BOUCHER, 1990). Em seguida, com a descoberta das carriquinas (FLEMATTI et al. 2004; VAN STADEN et al. 2004), um dos principais grupos de compostos isolados da fumaça, estudos sobre seus efeitos vêm sendo realizados em diversas vegetações propensas ao fogo ao redor do mundo, como os Fynbos, na África do Sul (BROWN, 1993<sup>a,b</sup>), Floresta de Banksia, Austrália Ocidental (DIXON et al. 1995), Chaparral na Califórnia (KEELEY & FOTHERINGHAM, 1998), regiões semiáridas do Irã (NAGHIPOUR et al. 2016), Bacia do Mediterrâneo (MOREIRA & PAUSAS, 2018) e no Cerrado no Brasil (ZIRONDI et al. 2019<sup>ab</sup>; RAMOS et al. 2019; FERNANDES et al. 2021; MOTTA et al. 2024). Além disso, espécies provenientes de ambientes não

propensos ao fogo, como árvores da Floresta Amazônica (FERRAZ et al. 2013) e espécies do bioma Karoo, na África do Sul (PIERCE et al. 1995), também podem responder à fumaça. Essa resposta pode indicar uma ancestralidade relacionada ao fogo, evidenciando um possível traço adaptativo (LAMONT & HE, 2017), ou resultar de uma evolução convergente associada à ação de compostos químicos promotores da germinação (LAMONT et al. 2018).

A fumaça e seus compostos podem atuar como gatilhos para a germinação por meio de mecanismos fisiológicos e moleculares, como a ativação de genes específicos relacionados à duplicação do DNA (CEMBROWSKA-LECH & KEPCZYŃSKI, 2017) e modulação de vias associadas à sinalização do fitocromo (GARDNER et al. 2001). Além disso, esses compostos podem induzir a divisão celular (SOÓS, 2009<sup>a,b</sup>), e quebrar a dormência fisiológica inerente do embrião (LAMONT & PAUSAS, 2023). Alterações estruturais e funcionais também ocorrem, como mudanças na permeabilidade da membrana, na extensibilidade da parede celular e na mobilização de reservas (SOÓS 2009<sup>a,b</sup>), processo regulado por enzimas hidrolíticas (CEMBROWSKA-LECH & KEPCZYŃSKI, 2017; BROWN & VAN STADEN, 1997; VAN STADEN et al., 2000). A fumaça também pode interagir com a regulação hormonal, reduzindo os níveis de ácido abscísico e aumentando a sensibilidade às giberelinas (SCHWACHTJE & BALDWIN, 2004).

Compostos orgânicos e inorgânicos liberados pela fumaça são capazes de estimular a germinação de sementes (KEELEY & PAUSAS, 2018), possuem atividade biológica em baixas concentrações (FLEMATTI et al. 2013), e são estáveis por longos períodos (BROWN & VAN STADEN, 1997; KEPCZYŃSKI, 2018). Entre esses compostos, destaca-se a carriquina [KAR<sub>1</sub>, 3-methyl-2H-furo (2,3-c) pyran-2-one], uma molécula orgânica da classe dos butenolídeos, obtida pela queima da celulose

(FLEMATTI et al. 2004; VAN STADEN et al. 2004). Além de estimular a germinação, a cariquina regula hormônios relacionados à dormência, como as giberelinas e o ácido abscísico (MENG et al. 2017), promove a expressão de genes induzidos por luz (NELSON et al. 2010), regula genes relacionados com as aquaporinas (SOÓS et al. 2010; BALDRIANOVÁ et al. 2015), e está vinculada à ativação do ciclo celular (KĘPCZYŃSKI et al. 2010). A resposta germinativa à KAR<sub>1</sub> pode ser influenciada por fatores como concentração utilizada, temperatura, regime de luz e estágio de maturação das sementes (LONG et al. 2011).

Outra classe de compostos produzidos pela queima de material vegetal são as cianoidrinas, sendo a mandelonitrila um exemplo representativo dessa classe (FLEMATTI et al. 2011, 2013; NELSON et al. 2012; KHATOON et al. 2020). Ecologicamente, as cianoidrinas atuam na recuperação das espécies vegetais após o fogo (FLEMATTI et al. 2011). Esses compostos podem permanecer por longos períodos na camada superficial do solo, e liberam cianeto lentamente após o contato com a água (FLEMATTI et al. 2013), o que pode estimular a germinação de sementes (MAJOR & ROBERTS, 1968; FLEMATTI et al. 2011; NELSON et al. 2012).

Recentemente, a hidroquinona foi identificada na fumaça derivada da queima de material vegetal (KAMRAN et al. 2017), sendo um composto originado da degradação da lignina (CAO et al. 2023). A hidroquinona demonstrou capacidade de potencializar a germinação (KAMRAN et al. 2017), além de promover o crescimento e desenvolvimento de mudas (LI et al. 2009).

### **Resposta das sementes ao armazenamento**

Ecologicamente as sementes podem permanecer armazenadas no banco de sementes do solo até que germinem em condições favoráveis; alternativamente, elas

podem ser armazenadas em laboratório, visando projetos de restauração (NELSON et al. 2012). O armazenamento pode induzir processos que favorecem a germinação quando as condições adequadas são alcançadas (BASKIN & BASKIN, 2020). Durante o armazenamento pode ocorrer a maturação do embrião e o alívio da dormência (CHANDRA et al. 2024; GOODWIN et al. 1995), por meio de mudanças bioquímicas e biomoleculares (HOLDSWORTH et al. 2008; BAZIN et al. 2011), além da ruptura mais rápida do endosperma (LEUBNER-METZGER, 2003).

O armazenamento pode aumentar a responsividade das sementes aos compostos da fumaça, tanto no solo (BAKER et al. 2005) quanto em laboratório (COMMANDER et al. 2009). A dormência das sementes garante a manutenção de sua viabilidade, até que condições favoráveis sejam alcançadas (BASKIN & BASKIN, 2014; RAMOS et al. 2017), enquanto os compostos da fumaça podem sinalizar um ambiente abundante em recursos com pouca competição (NELSON et al. 2012). No Cerrado, espécies de gramíneas têm sua germinação estimulada pelo armazenamento (RAMOS et al. 2017; DAIREL & FIDELIS, 2020). Além das gramíneas, espécies da família Asteraceae podem ter sua dormência fisiológica aliviada por períodos de armazenamento (BASKIN & BASKIN, 2020). Essas famílias, por sua vez, estão entre as mais representativas do Cerrado (FILGUEIRAS, 2002).

### **Cerrado - ecossistema tropical propenso ao fogo**

O Cerrado é considerado um hotspot mundial de biodiversidade (MYERS et al. 2000), constituído por diversas formações vegetacionais, desde formações campestres, savânicas e florestais (RIBEIRO & WALTER, 2008; OLIVEIRA-FILHO & RATTER, 2002; COUTINHO, 2006). Nesses ecossistemas, o fogo exerce pressão ecológica e evolutiva (MIRANDA et al. 2009; FURLEY, 1999) e as plantas apresentam adaptações

próprias aos regimes de fogo desse domínio, e muitas são consideradas dependes do fogo (COUTINHO, 1982). Quando ocorre naturalmente, o fogo no Cerrado é considerado de superfície, com curta duração, consumindo principalmente a biomassa seca de gramíneas (KAUFFMAN et al. 1994; RISSI et al. 2017; NEWBERRY et al. 2020). Estudos sobre a germinação de espécies herbáceas graminoides e herbáceas não-graminoides no Cerrado têm avaliado o efeito da fumaça na germinação (ZIRONDI et al. 2019<sup>ab</sup>; RAMOS et al. 2019; FERNANDES et al. 2021 MOTTA et al. 2024), mas pouco se sabe sobre o efeito do armazenamento (RAMOS et al. 2017; DAIREL & FIDELIS, 2020). E até o momento, não há estudos que avaliam os efeitos de compostos isolados da fumaça na germinação de espécies nativas do Cerrado. A dormência em sementes está presente nas principais famílias de espécies nativas, como Cyperaceae, Fabaceae, Poaceae, Melastomataceae, Xyridaceae, entre outras (DAYRELL et al. 2017).

Compreender como as sementes dormentes e as não dormentes respondem à fumaça e aos seus compostos isolados, bem como ao armazenamento, é fundamental para entender a ecologia da comunidade, além de colaborar com a restauração de ambientes degradados. Isso é possível, pois em projetos de semeadura direta, o tratamento das sementes com fumaça e/ou armazenamento pode ser utilizado como técnica de priming, aumentando, uniformizando ou acelerando o processo germinativo (MOYO et al. 2022).

Assim, o objetivo desta tese foi compreender os efeitos da fumaça, de seus compostos isolados e do armazenamento na germinação de espécies do Cerrado. No Capítulo I, investigamos o efeito da água de fumaça, em duas concentrações, na germinação de 42 espécies. No Capítulo II, avaliamos a interação entre armazenamento e fumaça na germinação de 36 espécies. No Capítulo III, analisamos o efeito dos compostos isolados da fumaça na germinação de 9 espécies.

## REFERÊNCIAS

ARCHIBOLD, O. W. Mediterranean ecosystems: ecology of world vegetation. **Chapman & Hall**, London, 1995.

BAKER, K. S.; STEADMAN, K. J.; PLUMMER, J. A.; MERRITT, D. J.; DIXON, K. W. Dormancy release in Australian fire ephemeral seeds during burial increases germination response to smoke water or heat. **Seed Science Research**, v. 15, n. 4, p. 339-348, 2005.

BALDRIANOVÁ, J.; ČERNÝ, M.; NOVÁK, J.; JEDELSKÝ, P. L.; DIVÍŠKOVÁ, E.; BRZOBOHATÝ, B. Arabidopsis proteome responses to the smoke-derived growth regulator karrikin. **Journal of Proteomics**, v. 120, p. 7-20, 2015.

BASKIN, C. C.; BASKIN, J. M. Breaking seed dormancy during dry storage: a useful tool or major problem for successful restoration via direct seeding?. **Plants**, v. 9, n. 5, p. 636, 2020.

BASKIN, C. C.; BASKIN, J. M. Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. Amsterdam: **Elsevier**, 2014.

BATCHELDER, R. B. Spatial and temporal patterns of fire in the tropical world. In: **Proceedings Tall Timbers Fire Ecology Conference**, Proceedings. Tallahassee: Tall Timbers Research Station, p. 171-190, 1967.

BAZIN, J.; LANGLADE, N.; VINCOURT, P.; ARRIBAT, S.; BALZERGUE, S.; EL-MAAROUF-BOUTEAU, H.; BAILLY, C. Targeted mRNA oxidation regulates sunflower seed dormancy alleviation during dry after-ripening. **The Plant Cell**, v. 23, n. 6, p. 2196-2208, 2011.

BOND, W. J.; VAN WILGEN, B. W. Surviving fires - vegetative and reproductive responses. In: BOND, W. J.; VAN WILGEN, B. W. **Fire and Plants**. p. 34-51, 1996.

BROWN, N. A. C. Promotion of germination of fynbos seeds by plant-derived smoke. **New Phytologist**, v. 123, n. 3, p. 575-583, 1993a.

BROWN, N. A. C. Seed germination in the fynbos fire ephemeral, *Syncarpha vestita* (L) B-Nord is promoted by smoke, aqueous extracts of smoke and charred wood derived from burning the ericoid-leaved shrub, *Passerina vulgaris* Thoday. **International Journal of Wildland Fire**, v. 3, n. 4, p. 203-206, 1993b.

BROWN, N.A.C; VAN STADEN, J. Smoke as a germination cue: a review. **Plant Growth Regulation**, v. 22, p. 115-124, 1997.

CAO, D.; BASKIN, J. M.; BASKIN, C. C.; LI, D. Z. Burning lignin: overlooked cues for post-fire seed germination. **Trends in Plant Science**, v. 28, n. 4, p. 386-389, 2023.

CEMBROWSKA-LECH, D.; KĘPCZYŃSKI, J. Plant-derived smoke induced activity of amylases, DNA replication and  $\beta$ -tubulin accumulation before radicle protrusion of dormant *Avena fatua* L. caryopses. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 39, p. 1-12, 2017.



CHANDRA, R. J.; MASILAMANI, P.; SUTHAKAR, B.; RAJKUMAR, P.; SIVAKUMAR, S. D.; MANONMANI, V. Seed dormancy and after-ripening mechanisms in seed germination: A comprehensive review. **International Journal of Plant & Soil Science**, v. 36, n. 10, p. 68-92, 2024.

COMMANDER, L. E.; MERRITT, D. J.; ROKICH, D. P.; DIXON, K. W. The role of after-ripening in promoting germination of arid zone seeds: a study on six Australian species. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 161, n. 4, p. 411-421, 2009.

COUTINHO, L. M. Ecological effects of fire in Brazilian Cerrado. In: HUNTLEY B. J.; WALKER B. H. (eds) **Ecology of tropical savannas**. Springer, Berlin, p. 273–291, 1982.

COUTINHO, L. M. O conceito de bioma. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, p. 13-23, 2006.

DAIREL, M.; FIDELIS, A. How does fire affect germination of grasses in the Cerrado?. **Seed Science Research**, v. 30, n. 4, p. 275-283, 2020.

DAYRELL, R. L.; GARCIA, Q. S.; NEGREIROS, D.; BASKIN, C. C.; BASKIN, J. M.; SILVEIRA, F. A. Phylogeny strongly drives seed dormancy and quality in a climatically buffered hotspot for plant endemism. **Annals of Botany**, v. 119, n. 2, p. 267-277, 2017.

DE LANGE, J. H.; BOUCHER, C. Autecological studies on *Audouinia capitata* (Bruniaceae). I. Plant-derived smoke as a seed germination cue. **South African Journal of Botany**, v. 56, n. 6, p. 700-703, 1990.

DIXON, K. W.; ROCHE, S.; PATE, J. S. The promotive effect of smoke derived from burnt native vegetation on seed germination of Western Australian plants. **Oecologia**, v. 101, p. 185-192, 1995.

FERNANDES, A. F.; OKI, Y.; FERNANDES, G. W.; MOREIRA, B. The effect of fire on seed germination of campo rupestre species in the South American Cerrado. **Plant Ecology**, v. 222, n. 1, p. 45-55, 2021.

FERRAZ, I. D. K.; ARRUDA, Y. M. B. C.; VAN STADEN, J. Smoke-water effect on the germination of Amazonian tree species. **South African Journal of Botany**, v. 87, p. 122-128, 2013.

FILGUEIRAS, T. S. Herbaceous plant communities. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (eds). **The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. New York: Columbia University Press, p. 121–139, 2002.

FLEMATTI, G. R.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; TRENGOVE, R. D. A compound from smoke that promotes seed germination. **Science**, v. 305, n. 5686, p. 977-977, 2004.

FLEMATTI, G. R.; MERRITT, D. J.; PIGGOTT, M. J.; TRENGOVE, R. D.; SMITH, S. M.; DIXON, K. W.; GHISALBERTI, E. L. Burning vegetation produces

cyanohydrins that liberate cyanide and stimulate seed germination. **Nature Communications**, v. 2, n. 1, p. 360, 2011.

FLEMATTI, G. R.; WATERS, M. T.; SCAFFIDI, A.; MERRITT, D. J.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; SMITH, S. M. Karrikin and cyanohydrin smoke signals provide clues to new endogenous plant signaling compounds. **Molecular Plant**, v. 6, n. 1, p. 29-37, 2013.

FURLEY, P. A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3-4, p. 223-241, 1999.

GARDNER, M. J.; DALLING, K. J.; LIGHT, M. E.; JÄGER, A.; VAN STADEN, J. Does smoke substitute for red light in the germination of light-sensitive lettuce seeds by affecting gibberellin metabolism?. **South African Journal of Botany**, v. 67, n. 4, p. 636-640, 2001.

GOODWIN, J. R.; DOESCHER, P. S.; EDDLEMAN, L. E. After-ripening in *Festuca idahoensis* seeds: adaptive dormancy and implications for restoration. **Restoration Ecology**, v. 3, n. 2, p. 137-142, 1995.

HOLDSWORTH, M. J.; BENTSINK, L.; SOPPE, W. J. Molecular networks regulating Arabidopsis seed maturation, after-ripening, dormancy and germination. **New Phytologist**, v. 179, n. 1, p. 33-54, 2008.

JONES, T. P.; LIM, B. Extraterrestrial impacts and wildfires. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, n. 1-4, p. 57-66, 2000.

KAMRAN, M.; KHAN, A. L.; ALI, L.; HUSSAIN, J.; WAQAS, M.; AL-HARRASI, A.; IMRAN, Q. M.; KIM, Y.-H.; KANG, S.-M.; YUN, B.-W.; LEE, I.-J. Hydroquinone; a novel bioactive compound from plant-derived smoke can cue seed germination of lettuce. **Frontiers in chemistry**, v. 5, p. 30, 2017.

KAUFFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in the Brazilian cerrado. **Journal of ecology**, v. 82, n. 3, p. 519-531, 1994.

KEELEY, J. E.; FOTHERINGHAM, C. J. Role of fire in regeneration from seed. In: FENNER, M (ed) **Seeds: the ecology of regeneration in plant communities**. Wallingford UK: Cabi Publishing, p. 311-330, 2000.

KEELEY, J. E.; FOTHERINGHAM, C. J. Smoke-induced seed germination in California chaparral. **Ecology**, v. 79, n. 7, p. 2320-2336, 1998.

KEELEY, J. E.; MORTON, B. A.; PEDROSA, A. M.; TROTTER, P. Role of allelopathy, heat and charred wood in the germination of chaparral herbs and suffrutescents. **The Journal of Ecology**, p. 445-458, 1985.

KEELEY, J. E.; PAUSAS, J. G. Evolution of 'smoke' induced seed germination in pyroendemic plants. **South African Journal of Botany**, v. 115, p. 251-255, 2018.

KEELEY, J. E.; PAUSAS, J. G.; RUNDEL, P. W.; BOND, W. J.; BRADSTOCK R. A. Fire as an evolutionary pressure shaping plant traits. **Trends in Plant Science**, v. 16, n. 8, p. 406-411, 2011.

KEELEY, S. C.; PIZZORNO, M. Charred wood stimulated germination of two fire-following herbs of the California chaparral and the role of hemicellulose. **American Journal of Botany**, v. 73, n. 9, p. 1289-1297, 1986.

KEPCZYŃSKI, J. Induction of agricultural weed seed germination by smoke and smoke-derived karrikin (KAR 1), with a particular reference to *Avena fatua* L. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, p. 1-10, 2018.

KEPCZYŃSKI, J.; CEMBROWSKA, D.; VAN STADEN, J. Releasing primary dormancy in *Avena fatua* L. caryopses by smoke-derived butenolide. **Plant Growth Regulation**, v. 62, p. 85-91, 2010.

KHATOON, A.; REHMAN, S. U.; ASLAM, M. M.; JAMIL, M.; KOMATSU, S. Plant-derived smoke affects biochemical mechanism on plant growth and seed germination. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 21, n. 20, p. 7760, 2020.

KOMAREK, E. V. Wildlife and fire research: past, present, and future. **US Dep. Agric. For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT**, v. 186, p. 1-7, 1985.

LAMONT, B. B.; HE, T. Fire-proneness as a prerequisite for the evolution of fire-adapted traits. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 4, p. 278-288, 2017.

LAMONT, B. B.; HE, T.; YAN, Z. Evolutionary history of fire-stimulated resprouting, flowering, seed release and germination. **Biological Reviews**, v. 94, n. 3, p. 903-928, 2018.

LAMONT, B. B.; PAUSAS, J. G. Seed dormancy revisited: Dormancy-release pathways and environmental interactions. **Functional Ecology**, v. 37, n. 4, p. 1106-1125, 2023.

LEUBNER-METZGER, G. Functions and regulation of  $\beta$ -1, 3-glucanases during seed germination, dormancy release and after-ripening. **Seed Science Research**, v. 13, n. 1, p. 17-34, 2003.

LI, M. F.; LI, W.; YANG, D. L.; SUN, P. The dormancy mechanism and bioactivity of hydroquinone extracted from *Podophyllum hexandrum* Royle seed. **Electronic Journal of Biology**, v. 5, n. 1, p. 11-16, 2009.

LONG, R. L.; STEVENS, J. C.; GRIFFITHS, E. M.; ADAMEK, M.; GORECKI, M. J.; POWLES, S. B.; MERRITT, D. J. Seeds of Brassicaceae weeds have an inherent or inducible response to the germination stimulant karrikinolide. **Annals of Botany**, v. 108, n. 5, p. 933-944, 2011.

MAJOR, W.; ROBERTS, E. H. Dormancy in cereal seeds: I. The effects of oxygen and respiratory inhibitors. **Journal of Experimental Botany**, v. 19, n. 1, p. 77-89, 1968.

MENG, Y.; SHUAI, H.; LUO, X.; CHEN, F.; ZHOU, W.; YANG, W.; SHU, K. Karrikins: regulators involved in phytohormone signaling networks during seed germination and seedling development. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 2021, 2017.

MIRANDA H. S.; SATO, M. N.; AIRES, F. S. Fires in the Cerrado, the Brazilian savanna. In: COCHRANE M. A. (ed) Tropical fire ecology: climate change, land use and ecosystem dynamics. **Springer**, Berlin, pp 427–450, 2009.

MOREIRA, B.; PAUSAS, J. G. Shedding light through the smoke on the germination of Mediterranean Basin flora. **South African Journal of Botany**, v. 115, p. 244-250, 2018.

MOTTA, G. S. T.; PILON, N.; FIDELIS, A.; KOLB, R. Smoke effects on the germination of Cerrado species. **Plant Ecology**, p. 1-9, 2024.

MOYO, M.; AMOO, S. O.; VAN STADEN, J. Seed priming with smoke water and karrikin improves germination and seedling vigor of *Brassica napus* under varying environmental conditions. **Plant Growth Regulation**, v. 97, n. 2, p. 315-326, 2022.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NAGHIPOUR, A. A.; BASHARI, H.; KHAJEDDIN, S. J.; TAHMASEBI, P.; IRAVANI, M. Effects of smoke, ash and heat shock on seed germination of seven species from Central Zagros rangelands in the semi-arid region of Iran. **African Journal of Range & Forage Science**, v. 33, n. 1, p. 67-71, 2016.

NELSON, D. C.; FLEMATTI, G. R.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; SMITH, S. M. Regulation of seed germination and seedling growth by chemical signals from burning vegetation. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, n. 1, p. 107-130, 2012.

NELSON, D. C.; FLEMATTI, G. R.; RISEBOROUGH, J. A.; GHISALBERTI, E. L.; DIXON, K. W.; SMITH, S. M. Karrikins enhance light responses during germination and seedling development in *Arabidopsis thaliana*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 15, p. 7095-7100, 2010.

NEWBERRY, B. M.; POWER, C. R.; ABREU, R. C.; DURIGAN, G.; ROSSATTO, D. R.; HOFFMANN, W. A. Flammability thresholds or flammability gradients? Determinants of fire across savanna–forest transitions. **New Phytologist**, v. 228, n. 3, p. 910-921, 2020.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. A. Vegetation physiognomies and woody flora of the cerrado biome. In: OLIVEIRA, P. S.; MARQUIS, R. J. (eds). **The cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna**. Columbia University Press, 2002. p. 91-120.

PARR, C. L.; LEHMANN, C. E. R.; BOND, W. J.; HOFFMANN, W. A.; ANDERSEN, A. N. Tropical grassy biomes: misunderstood, neglected, and under threat. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 29, n. 4, p. 205-213, 2014.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. E. A burning story: the role of fire in the history of life. **BioScience**, v. 59, n.7, p. 593-601, 2009.

PIERCE, S. M.; ESLER, K.; COWLING, R. M. Smoke-induced germination of succulents (Mesembryanthemaceae) from fire-prone and fire-free habitats in South Africa. **Oecologia**, v. 102, p. 520-522, 1995.

RAMOS, D. M.; DINIZ, P.; OOI, M. K. J.; BORGHETTI, F.; VALLS, J. F. M. Avoiding the dry season: dispersal time and syndrome mediate seed dormancy in grasses in Neotropical savanna and wet grasslands. **Journal of Vegetation Science**, v. 28, n. 4, p. 798-807, 2017.

RAMOS, D. M.; VALLS, J. F. M.; BORGHETTI, F.; OOI, M. K. J. Fire cues trigger germination and stimulate seedling growth of grass species from Brazilian savannas. **American Journal of Botany**, v. 106, n. 9, p. 1190-1201, 2019.

RAMOS-NETO, M. B.; PIVELLO, V. R. Lightning fires in a Brazilian savanna national park: rethinking management strategies. **Environmental management**, v. 26, p. 675-684, 2000.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (eds). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, v. 1, p. 151-212, 2008.

RISSI, M. N.; BAEZA, M. J.; GORGONE-BARBOSA, E.; ZUPO, T.; FIDELIS, A. Does season affect fire behaviour in the Cerrado?. **International Journal of Wildland Fire**, v. 26, n. 5, p. 427-433, 2017.

SCHWACHTJE, J.; BALDWIN, I. T. Smoke exposure alters endogenous gibberellin and abscisic acid pools and gibberellin sensitivity while eliciting germination in the post-fire annual, *Nicotiana attenuata*. **Seed Science Research**, v. 14, n. 1, p. 51-60, 2004.

SCOTT, A. C. The Pre-Quaternary history of fire. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 164, n. 1-4, p. 281-329, 2000.

SOÓS, V.; JUHÁSZ, A.; LIGHT, M. E.; VAN STADEN, J.; BALÁZS, E. Smoke-water-induced changes of expression pattern in Grand Rapids lettuce achenes. **Seed Science Research**, v. 19, n. 1, p. 37-49, 2009a.

SOÓS, V.; SEBESTYÉN, E.; JUHÁSZ, A.; LIGHT, M. E.; KOHOUT, L.; SZALAI, G.; TANDORI, J.; VAN STADEN, J.; BALÁZS, E. Transcriptome analysis of germinating maize kernels exposed to smoke-water and the active compound KAR 1. **BMC plant biology**, v. 10, p. 1-16, 2010.

SOÓS, V.; SEBESTYÉN, E.; JUHÁSZ, A.; PINTÉR, J.; LIGHT, M. E.; VAN STADEN, J.; BALÁZS, E. Stress-related genes define essential steps in the response of maize seedlings to smoke-water. **Functional & Integrative Genomics**, v. 9, p. 231-242, 2009b.

VAN STADEN, J.; BROWN, N. A.; JÄGER, A. K.; JOHNSON, T. A. Smoke as a germination cue. **Plant Species Biology**, v. 15, n. 2, p. 167-178, 2000.

VAN STADEN, J.; JÄGER, A. K.; LIGHT, M. E.; BURGER, B. V. Isolation of the major germination cue from plant-derived smoke. **South African Journal of Botany**, v. 70, n. 4, p. 654-659, 2004.

VELDMAN, J. W.; BUISSON, E.; DURIGAN, G.; FERNANDES, G. W.; LE STRADIC, S.; MAHY, G.; NEGREIROS, D.; OVERBECK, G. E.; VELDMAN, R. G.; ZALOUMIS, N. P.; PUTZ, F. E.; BOND, W. J. Toward an old-growth concept for grasslands, savannas, and woodlands. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 13, n. 3, p. 154-162, 2015.

WICKLOW, D. T. Germination response in *Emmenanthe penduliflora* (Hydrophyllaceae). **Ecology**, v. 58, n. 1, p. 201-205, 1977.

ZIRONDI, H. L.; PINHO JOSÉ, H. de; DAIBES, L. F.; FIDELIS, A. Heat and smoke affect the germination of flammable resprouters: *Vellozia* species in the Cerrado. **Folia Geobotanica**, v. 54, p. 65-72, 2019a.

ZIRONDI, H. L.; SILVEIRA, F. A.; FIDELIS, A. Fire effects on seed germination: heat shock and smoke on permeable vs impermeable seed coats. **Flora**, v. 253, p. 98-106, 2019b.

## CONCLUSÃO GERAL

Concluimos que o efeito da fumaça na germinação de plantas do Cerrado é espécie-específico e que a concentração utilizada pode influenciar a resposta germinativa. O armazenamento de sementes pode favorecer a germinação por meio da quebra de dormência em certas espécies, contudo, pode também ser prejudicial, aumentando a infestação por fungos ou diminuindo a viabilidade. Além disso, algumas espécies necessitam da interação entre armazenamento e fumaça melhorar para germinar.

Os compostos isolados apresentam efeitos variados, a fumaça derivada de lignina (hidroquinona) prejudica a germinação e a viabilidade das sementes em altas concentrações, mas também demonstrou um efeito estimulante na germinação em certas espécies. A fumaça derivada de celulose (carriquina) e as cianoidrinas (mandelonitrila) mostraram capacidade de estimular a germinação de duas espécies de gramíneas.

Espécies que apresentam aumento na porcentagem de germinação ou redução no tempo médio de germinação em resposta a fumaça, seus compostos isolados e o armazenamento podem adquirir uma vantagem competitiva, aumentando as chances de sobrevivência em ambientes pós-fogo ou em contexto de restauração ecológica.