



Análise Bayesiana da Germinação de *Euterpe precatoria* Mart. –Arecaceae: Influência de Temperaturas Extremas e Água de Fumaça

Margarene Farias França ¹, Marcus Vinicius de Athaydes Liesenfeld ^{2*}

¹Engenheira Florestal, Centro Multidisciplinar, Universidade Federal do Acre, Brasil.

²Doutor em Ciências de Florestas Tropicais, Laboratório de Eco-Anatomia e Ecologia Vegetal, Centro Multidisciplinar, Universidade Federal do Acre, Brasil. (*Autor correspondente: marcus.athaydes@ufac.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 16/04/2025 – Revisado em: 15/05/2025 – Aceito em: 20/06/2025

RESUMO

(Análise Bayesiana da Germinação de *Euterpe precatoria* Mart. –Arecaceae: Influência de Temperaturas Extremas e Água de Fumaça). A família Arecaceae, uma das mais antigas e diversificadas do planeta, inclui espécies como *Euterpe precatoria* (açai) que apresentam germinação lenta influenciada por fatores ambientais. Este estudo avaliou os efeitos de temperaturas elevadas (120°C, 180°C e 240°C por 3 minutos) e água de fumaça na germinação da espécie, utilizando um delineamento experimental com réplicas e análise bayesiana. Os resultados demonstraram que as temperaturas de 120°C e 180°C não afetaram significativamente a germinação (75-83%), enquanto 240°C foi letal (Seed Thermal Death), impedindo completamente a germinação; já o tratamento com água de fumaça apresentou o melhor desempenho (90% de germinação e maior Índice de Velocidade de Germinação - IVG=14), confirmado estatisticamente pelo modelo bayesiano (aumento de ~3% em relação ao controle), indicando seu potencial como estimulante germinativo e reforçando a sensibilidade das sementes a temperaturas extremas, com implicações para o manejo e conservação desta espécie em cenários de mudanças climáticas.

Palavras-Chaves: dormência, floresta ombrófila, sementes.

Bayesian Analysis of Germination of *Euterpe precatoria* Mart. –Arecaceae: Influence of Extreme Temperatures and Smoke Water

ABSTRACT

(Bayesian Analysis of *Euterpe precatoria* Mart. – Arecaceae Germination: Influence of Extreme Temperatures and Smoke Water). The Arecaceae family, one of the oldest and most diverse on the planet, includes species such as *Euterpe precatoria* (açai) that exhibit slow germination influenced by environmental factors. This study evaluated the effects of elevated temperatures (120°C, 180°C, and 240°C for 3 minutes) and smoke water on the germination of the species, using an experimental design with replicates and Bayesian analysis. The results showed that temperatures of 120°C and 180°C did not significantly affect germination (75-83%), while 240°C was lethal (Seed Thermal Death), completely preventing germination; in contrast, the smoke water treatment showed the best performance (90% germination and highest Germination Speed Index - GSI=14), statistically confirmed by the Bayesian model (increase of ~3% compared to the control), indicating its potential as a germination stimulant and reinforcing seed sensitivity to extreme temperatures, with implications for the management and conservation of this species under climate change scenarios.

Keywords: dormancy, tropical rainforest, seeds.

1. Introdução

O açai, *Euterpe precatoria* Mart. (Arecaceae), é uma espécie nativa da Amazônia que tradicionalmente possui grande valor econômico, sobretudo pelo fruto que é utilizado na produção de sucos e polpas. O caroço (i.e., pirênio: formado pela junção do endocarpo e semente), contendo somente um embrião (Galotta e Boaventura, 2005), também é empregado na produção de artesanato. *Euterpe precatoria* tem ocorrência nos estados do Acre, Rondônia, Pará e Amazonas em áreas inundadas ao longo dos rios e igarapés, sendo a palmeira mais abundante e frequente na Amazônia (Kristiansen et al., 2011). Apesar de sua relevância econômica e cultural, há escassez de estudos sobre seus processos germinativos, especialmente os associados à quebra de dormência e velocidade de germinação.

Euterpe precatoria, semelhante a outras espécies da família Arecaceae, também apresenta peculiaridades no processo germinativo, como germinação lenta, influenciada por características das sementes e fatores como luz, temperatura, idade da semente e dormência (Tarqui et al., 2024). O tempo de germinação varia amplamente entre as Arecaceae, podendo ser de semanas ou anos (Cunha e Jardim, 1995; Lorenzi et al., 2004; Ferreira et al., 2021; Souza et al., 2022). A germinação de *E. precatoria* é documentada como sendo entre 30 e 90 dias (Lorenzi et al., 2004; Gama et al., 2010). Estudos que visam superar a dormência em algumas espécies de palmeiras são de fundamental importância para melhorar a compreensão dos processos de germinação (Ferreira e Gentil, 2006; Ferreira et al., 2010; Tarqui et al., 2024).

Além da disponibilidade de água, temperatura e luz, fatores como a interação com compostos químicos do ambiente também influenciam a germinação das sementes e a quebra de dormência, sendo esses mecanismos amplamente distribuídos entre espécies da flora mundial, geralmente reconhecidos como fatores especiais de germinação (Zahed e Baczek-Kwinta, 2023). Algumas espécies necessitam de fatores externos especiais, como calor e fumaça, para estimular a germinação, seja como agentes de estresse ou como gatilhos para quebra de dormência (Moreira et al., 2010; Moreira e Pausas, 2018). Estes fatores são também documentados como importantes na germinação de sementes em Arecaceae (Moussa et al., 1998; Tarqui et al., 2024). A evolução de estratégias que aumentam as chances de estabelecimento das plântulas pode representar uma vantagem adaptativa, especialmente em ecossistemas onde a germinação depende de condições ambientais específicas (Mojzes et al., 2015).

A fumaça gerada pela queima da vegetação é um estímulo conhecido para a germinação de sementes, especialmente em ecossistemas sujeitos a incêndios (Van Staden et al., 2000; Abedi et al., 2017), mas seus efeitos podem se estender até mesmo a espécies não pirofilicas (Ferraz et al., 2013; Zironi et al., 2019). Estudos indicam que mais de 1.200 espécies de diferentes famílias botânicas em diversos continentes, respondem à fumaça, principalmente devido à presença do composto químico karrikinolida (Blank e Young, 1998; Ren et al., 2017; Zahed e Baczek-Kwinta, 2023; Motta et al., 2024). Além disso, a resposta germinativa à fumaça parece ser amplamente independente da estratégia de regeneração das plantas, forma de vida, massa da semente e modo de dispersão (Mojzes et al., 2015).

A temperatura também desempenha um papel crucial na germinação, com uma faixa térmica ótima e um limite que acelera o processo (Souza et al., 2007). Essa amplitude térmica varia entre espécies e está relacionada ao habitat, influenciando a regeneração e distribuição geográfica (Cipriani et al., 2023). Os limites mínimo (base temperature, T_b) e máximo (ceiling temperature, T_c) determinam a faixa térmica suportada por uma espécie, enquanto a temperatura ótima é aquela que permite 95% do sucesso germinativo. No intervalo infra-ótimo, o aumento da temperatura acelera a germinação devido à ativação metabólica, enquanto no supra-ótimo, a germinação é reduzida pela inativação ou desnaturação enzimática, até um limite letal.

Compreender como sementes de espécies não adaptadas ao fogo respondem a estímulos como calor e fumaça é essencial para determinar seus limites fisiológicos germinativos e sua resiliência frente a mudanças climáticas globais. Nesse estudo, adota-se a análise de germinação por inferência bayesiana devido sua capacidade de modelar diretamente a distribuição binomial dos dados de germinação, relacionando adequadamente a incerteza associada a respostas não lineares, aos estímulos de calor e fumaça. Diferentemente dos métodos tradicionais (e.g., ANOVA), que exigem normalidade e homocedasticidade, a abordagem bayesiana contorna a instabilidade de amostras pequenas e a heterogeneidade de variâncias.

Com base no exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar, utilizando a inferência bayesiana (não frequentista), os efeitos de altas temperaturas e água da fumaça na germinação das sementes de *Euterpe*

precatória Mart. (Arecaceae), abordando: 1) o impacto de tratamentos térmicos extremos (120°C, 180°C e 240°C) e água de fumaça na germinação (germinabilidade ou % germinação cumulativa); 2) a comparação do Índice de Velocidade de Germinação (IVG) entre tratamentos e controle; e 3) a determinação da temperatura letal crítica para a mortalidade total das sementes (*Seed Thermal Death*).

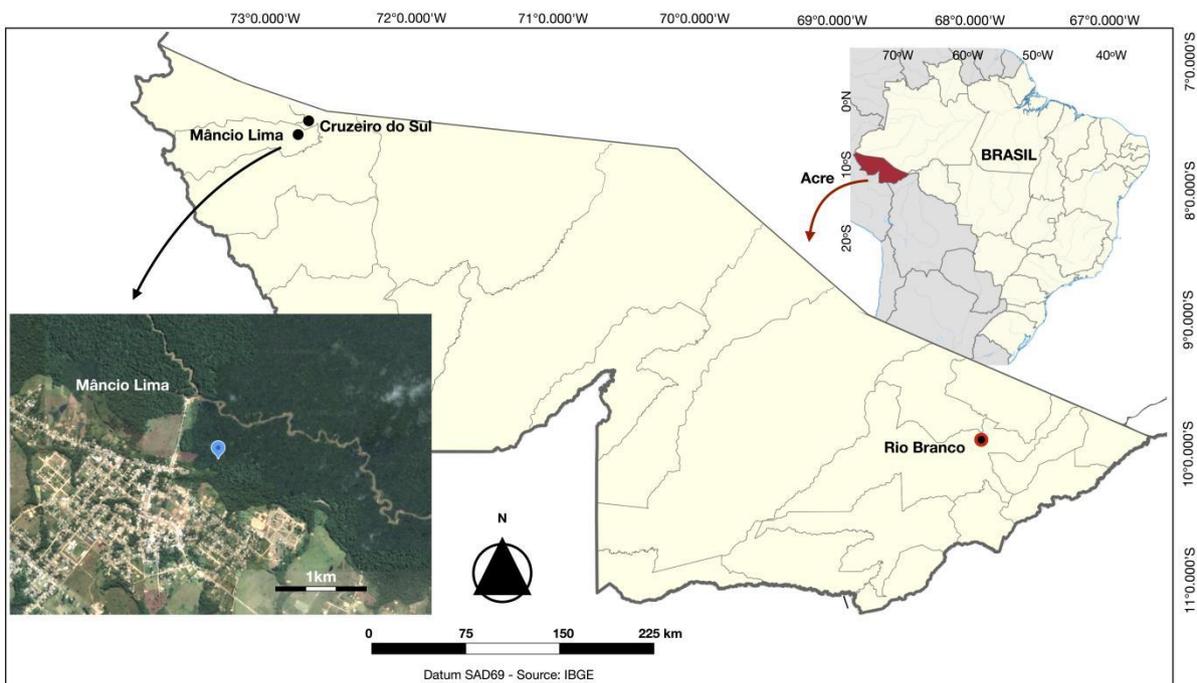
2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

A coleta dos frutos das espécies do estudo foi realizada entre as coordenadas 72°53'45"W e 07°36'51"S, em Floresta Aberta com Palmeiras, no município de Mâncio Lima no estado do Acre, Brasil (Figura 1).

Figura 1 - Localização geográfica do ponto de coleta no município de Mâncio Lima (marcador azul 72°53'45"W e 07°36'51"S), Estado do Acre, Brasil.

Figure 1 - Geographical location of the collection point in the municipality of Mâncio Lima (blue marker 72°53'45"W and 07°36'51"S, State of Acre, Brazil).



A região possui clima caracterizado como tropical e úmido, com temperatura média anual de 25°C, e média pluviométrica anual de aproximadamente 2.171,3 mm. A umidade do ar é relativamente elevada, com tempo médio de insolação de aproximadamente 1.340 horas/ano, um dos menores do país (Ribeiro, 1977).

2.2 Descrição da Espécie de estudo

Euterpe precatória pertence à família Arecaceae, considerada uma das famílias botânicas mais antigas do planeta (Lorenzi et al., 2004). Arecaceae possui grande diversidade de espécies no Brasil, também com grande variedade de hábitos e amplitude ecológica, estando amplamente distribuída em todas as regiões fitogeográficas brasileiras. A família está dividida em seis subfamílias, 200 gêneros e 1.500 espécies (Galotta e Boaventura, 2005; Lorenzi et al., 2010). O gênero *Euterpe* Mart. reúne 28 espécies nativas da América Tropical, com destaque para *Euterpe oleraceae* Mart., *Euterpe edulis* Mart. e *Euterpe precatória* Mart., de nomes comuns assaí, açai ou palmito. *Euterpe precatória* possui estipe monopodial, produzindo inflorescências interfoliares, de consequentes frutos globosos de cor púrpuro-negra. As folhas possuem pinas

estreitas, eventualmente pêndulas, bainha verde ou verde com listas verticais amarelas; inflorescências grandes e com ráquias mais grossas; frutos de 1 a 1,3cm de diâmetro (Lorenzi et al., 2004).

As sementes de *E. precatória* possuem um embrião semelhante a uma rolha, inserido no endosperma, composto por duas partes: uma responsável pela formação das folhas verdadeiras e outra pelas raízes, ambas envolvidas por uma folha cotiledonar simples (Lorenzi et al., 2004; Henderson, 2006; Queiroz e Bianco, 2009). Charlo et al. (2006) descrevem dois tipos de germinação em palmeiras: a hipógea, em que o cotilédone permanece abaixo ou na superfície do solo, e a criptocotiledonar, em que o cotilédone não emerge do tegumento, permanecendo dentro da semente. Sementes de palmeiras frequentemente apresentam dormência, e o crescimento embrionário é lento e contínuo, assim como o desenvolvimento das plântulas, uma característica relacionada à mobilização das reservas orgânicas (Cunha e Jardim, 1995).

2.3 Procedimentos pré-germinativos

Os frutos foram coletados diretamente dos cachos em junho de 2018 e trazidos para laboratório. Com o auxílio de um paquímetro foram feitas análises biométricas em um sub-lote de 20 frutos. O comprimento dos pirênios variou entre 0,5 e 1,0 cm, enquanto a largura foi de 0,1 cm. A massa das sementes apresentou variação entre 1,27 e 5,5 g (N=20).

Na preparação para os testes de germinação, os frutos foram lavados e ficaram imersos em água, em temperatura ambiente, por um período de 12 horas. Em seguida foram despolpados manualmente, com auxílio de uma peneira, sem a utilização de água. Após as despolpa os pirênios foram direcionados imediatamente para comporem os tratamentos e o controle do teste de germinação.

2.4 Desenho Amostral

Os tratamentos simulam temperaturas extremas, bem como a influência da fumaça (fumo líquido). Foram quatro tratamentos mais o Controle em delineamento experimental blocos casualizados. Para o Controle (temperatura ambiente) e para cada tratamento (T1:120°C, T2:180°C, T3:240°C e T4:água de fumaça) foram utilizadas 100 sementes divididas em quatro réplicas de 25 sementes cada, totalizando 500 sementes (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos empregados no teste de germinação de *Euterpe precatória*.
Table 1 - Description of treatments used in the *Euterpe precatória* germination test.

Tratamentos	Temperatura do teste	Tempo na estufa	Número de réplicas	Total de sementes
T1:120	120°C	3 minutos	4	100
T2:180	180°C	3 minutos	4	100
T3:240	240°C	3 minutos	4	100
T4:Fumaça	Ambiente	-	4	100
Controle	Ambiente	-	4	100

As sementes por réplica foram submetidas às temperaturas de dentro de uma estufa de laboratório, por três minutos. Imediatamente após, as sementes foram transferidas para canteiros preparados com substrato de areia para todos os tratamentos, bem como para o Controle (Fichino et al., 2016).

A água de fumaça do Tratamento T4, foi obtida a partir de uma solução preparada a partir de 10 g de biomassa vegetal, queimada em estufa a 200°C por 30 min, sendo depois diluída em 100 ml de água destilada (segundo preparação proposta por Çatav et al., 2015). Nesse processo, as substâncias ativas da fumaça são incorporadas à água (Jäger et al., 1996). As sementes do T4 foram submetidas a molho de 12h na água de fumaça antes da sementeira. Todos os tratamentos foram regados periodicamente com água não destilada. Os canteiros estavam posicionados em viveiro coberto e completamente telado, localizado no Campus Floresta da Universidade Federal do Acre.

2.5 Análise dos Dados

Para fins de análise, os pirênios serão tratados como sementes. A influência do calor e da fumaça foi analisada com base no número de sementes germinadas nos tratamentos. A germinação foi registrada como a emergência da plântula a partir do solo (Santana e Ranal, 2004). Os dados de germinação foram organizados e analisados considerando os tempos de 43, 74 e 104 dias após a semeadura. Para cada tratamento e repetição, a germinação cumulativa foi calculada somando-se o número de sementes germinadas em cada tempo ao valor acumulado nos tempos anteriores.

Para comparação da eficiência dos tratamentos na germinação, utilizou-se a estatística bayesiana, que incorpora incertezas de forma natural e flexível na construção de modelos preditivos. O modelo final foi ajustado com a implementação de modelos hierárquicos e a especificação de distribuições *a priori*, e adotou-se a distribuição beta-binomial, o que permite incorporar variabilidade extra nos dados. O modelo foi configurado com quatro cadeias (Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov –MCMC), cada uma com 6000 iterações, sendo 1500 de warmup, totalizando 18000 amostras pós-warmup. O *warmup* refere-se a fase inicial das iterações do modelo, descartada para garantir que as amostras sejam coletadas após a convergência do modelo, removendo a influência dos valores iniciais.

O modelo testado incluiu a variável 'Tratamento' como preditor fixo e um efeito aleatório para as réplicas (Repeticao), com a estrutura:

$$Germinacao | trials(TotalSementes) \sim Tratamento + (1 | Repeticao)$$

Priors com distribuição normal (média 0, desvio padrão 1) foram usados para os coeficientes de regressão, e uma distribuição exponencial (taxa 1) para o parâmetro de dispersão (ϕ). A convergência do modelo foi verificada por meio dos valores de Rhat (medida de convergência das cadeias MCMC), todos iguais a 1.00, e pelos tamanhos efetivos das amostras (Bulk_ESS e Tail_ESS), que indicaram eficiência e confiabilidade nas estimativas.

Para comparação da Velocidade de germinação utilizou-se a fórmula proposta por Maguire (1962), do IVG (Índice de Velocidade de Germinação), obtida pela contagem de sementes germinadas a cada tempo de verificação (N_i), e pelo número de dias correspondente ao tempo de germinação (D_i):

$$IVG = \sum \left(\frac{N_i}{D_i} \right)$$

A obtenção do *Seed Thermal Death*, morte de 100% das sementes nos tratamentos foi avaliada com base nos resultados obtidos através da Germinação (%) entre os tratamentos, considerada a temperatura de 240°C a máxima e, portanto, a temperatura estipulada onde ocorrerá a maior mortalidade das sementes (100% ou próximo de fracasso na germinação). Para todo processamento estatístico foi utilizado o software R v.4.3.1 (R Core Team, 2016), com o auxílio das bibliotecas 'dplyr', 'drc' e 'ggplot2', para análises e gráficos e o pacote 'bmr' para a inferência bayesiana.

3. Resultados

A germinação foi monitorada por 110 dias a partir da semeadura, e ocorreu no Controle e em três dos quatro tratamentos. A temperatura imposta no tratamento de 180°C (T2) não foi suficiente para causar mortalidade das sementes, pois estas germinaram de forma semelhante aos demais tratamentos. No entanto, a temperatura de 240°C (T3) foi identificada como a "temperatura de morte das sementes" (*Seed Thermal Death*), uma vez que nenhuma semente germinou sob essa condição. Dessa forma o tratamento T3 foi excluído das análises posteriores. Na germinação acumulada, T4 - água de fumaça apresentou a maior germinação cumulativa, 90%, seguido de T2 - 180°C, com 83% (Tabela 2, Figura 2).

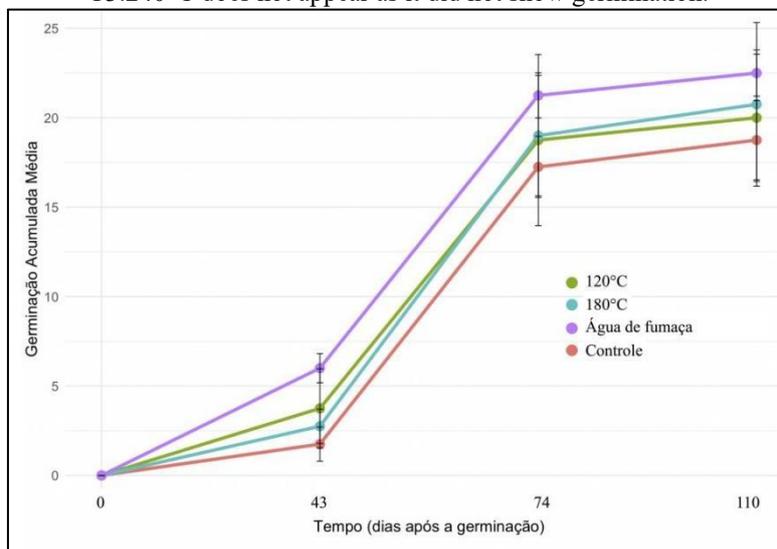
Tabela 2 - Resultados obtidos para porcentagem de germinação acumulada após 110 dias (%Germinação), Índice de Velocidade de Germinação (IVG) e % Média de Germinação \pm Desvio Padrão, para a espécie *Euterpe precatoria* Mart., para os Tratamentos T1: 120°C, T2: 180°C, T3: 240°C e T4 - água de fumaça.

Table 2 - Results obtained for percentage of accumulated germination after 110 days (%Germination), Germination Speed Index (GVI) and Average % Germination \pm Standard Deviation, for the species *Euterpe precatoria* Mart., for Treatments T1: 120°C, T2: 180°C, T3: 240°C and T4 - smoke water.

Tratamentos	% Germinação	IVG	% Média Desvio Padrão
T1:120	80	11,7	20 \pm 3,56
T2:180	83	11,5	20.8 \pm 4.57
T3:240	0	0	0
T4:Fumaça	90	14,0	22,5 \pm 1,29
Controle	75	10,0	18,8 \pm 2,22

Figura 2 - Germinação acumulada média (%G) após 110 dias para a espécie *Euterpe precatoria* Mart., para os Tratamentos T1: 120°C, T2: 180°C e T4 - água de fumaça. Erros padrão representado pelas barras verticais. O Tratamento T3:240°C não aparece por não ter exibido germinação.

Figure 2 - Average accumulated germination (%G) after 110 days for the species *Euterpe precatoria* Mart., for Treatments T1: 120°C, T2: 180°C and T4 - smoke water. Standard errors represented by vertical bars. Treatment T3:240°C does not appear as it did not show germination.



Os resultados do modelo estatístico bayesiano beta-binomial indicam que o tratamento T4 - água de fumaça, teve um efeito positivo e significativo na germinação das sementes, com um coeficiente estimado de 0,17 e um intervalo de credibilidade de 95% que não inclui zero (0,04 a 0,30). Isso mostra que o T4 aumentou significativamente a probabilidade de germinação em comparação com o Controle. Em contraste, os tratamentos T1-120°C e T2-180°C apresentaram efeitos não significativos, com coeficientes próximos de zero e intervalos de credibilidade que incluem valores negativos e positivos (T1: -0,10 a 0,16; T2: -0,03 a 0,23), indicando que esses tratamentos não diferem significativamente do Controle (Tabela 3, Figura 3).

Tabela 3 - Coeficientes de Regressão para o teste de germinação com *Euterpe precatoria* Mart., para os Tratamentos T1: 120°C, T2: 180°C e T4 - água de fumaça. Rhat: medida de convergência das cadeias MCMC; Bulk_ ESS: Tamanho efetivo da amostra - central; Tail_ ESS: Tamanho efetivo da amostra - posterior. *Phi* - Parâmetro de dispersão. O Tratamento T3:240°C não aparece por não ter exibido germinação.

Table 3 - Regression Coefficients for the germination test with *Euterpe precatoria* Mart., for Treatments T1: 120°C, T2: 180°C and T4 - smoke water. Rhat: convergence measure of MCMC chains; Bulk_ ESS: Effective sample size - central; Tail_ ESS: Effective sample size - after. Phi - Dispersion parameter. Treatment T3:240°C does not appear as it did not show germination.

Coeficiente	Estimativa	Erro Padrão	IC 95% Inferior	IC 95% Superior	Rhat	Bulk_ ESS	Tail_ ESS
Intercepto (Controle)	-1.05	0.26	-1.52	-0.53	1.00	4703	4878
T1:120	0.03	0.07	-0.10	0.16	1.00	11219	11613
T2:180	0.10	0.07	-0.03	0.23	1.00	10956	11790
T4:água de fumaça	0.17	0.07	0.04	0.30	1.00	10411	11468
sd(Intercept)	0.40	0.33	0.13	1.28	1.00	3856	4994
<i>phi</i>	2.78	0.09	2.61	2.96	1.00	14449	11952

Figura 3 - Efeitos dos tratamentos na probabilidade logística da germinação de *Euterpe precatoria* Mart., Tratamentos T1: 120°C, T2: 180°C e T4 - água de fumaça ao final de 110 dias após a semeadura. O Tratamento T3:240°C não aparece por não ter exibido germinação. Os intervalos de credibilidade de 95% dos tratamentos que cruzam o zero não são estatisticamente significativos.

Figure 3 - Effects of treatments on the logistic probability of germination of *Euterpe precatoria* Mart., Treatments T1: 120°C, T2: 180°C and T4 - smoke water at the end of 110 days after sowing. Treatment T3:240°C does not appear as it did not show germination. The 95% credibility intervals of treatments that cross zero are not statistically significant.

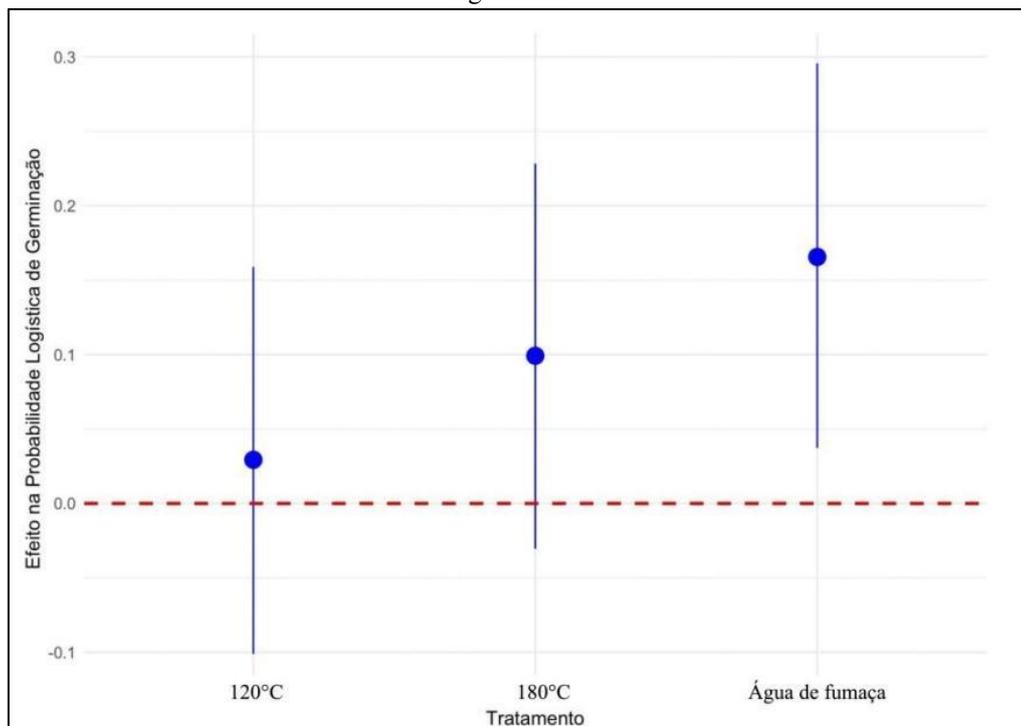
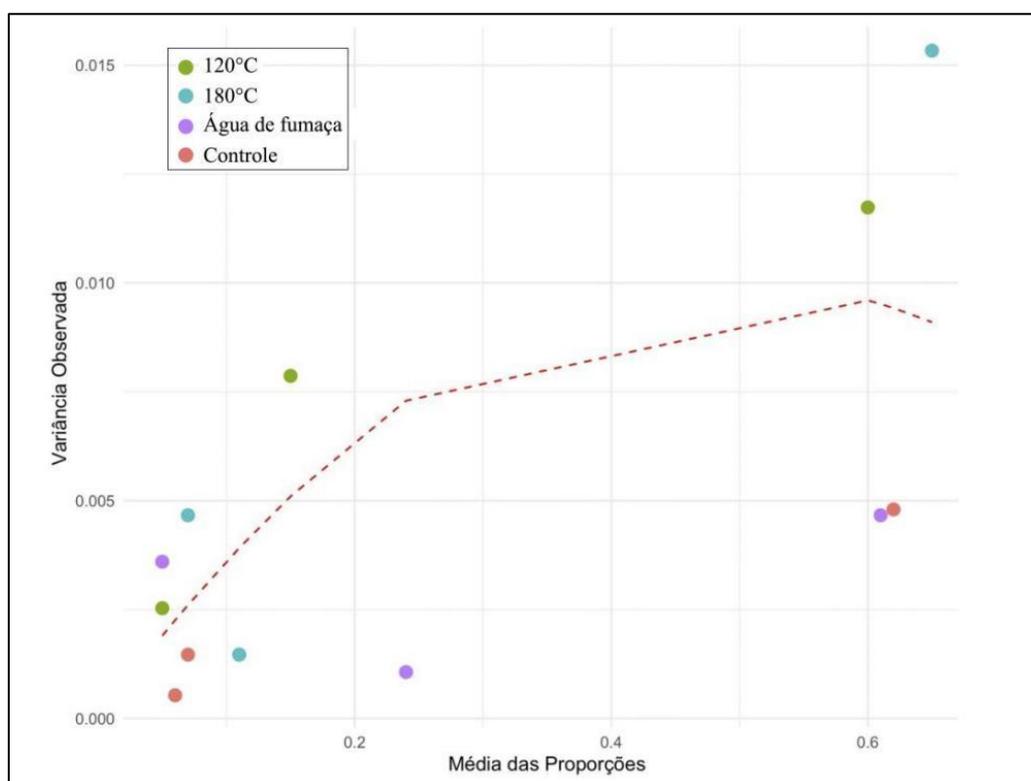


Figura 4 - Distribuição da variância observada *versus* média da proporções indicando superdispersão dos dados – pontos acima da variância esperada sob distribuição binomial (linha tracejada vermelha), na germinação de *Euterpe precatoria* influenciada pelos Tratamentos T1: 120°C, T2: 180°C e T4 - água de fumaça ao final de 110 dias após a semeadura. O Tratamento T3:240°C não aparece por não ter exibido germinação.

Figure 4 - Distribution of observed variance versus mean proportions indicating overdispersion of data – points above the expected variance under binomial distribution (red dashed line), in the germination of *Euterpe precatoria* influenced by Treatments T1: 120°C, T2: 180°C and T4 - smoke water at the end of 110 days after sowing. Treatment T3:240°C does not appear as it did not show germination.



O intercepto (probabilidade média de germinação no Controle) foi estimado em -1,05 no espaço logit, o que corresponde a uma probabilidade de aproximadamente 26% na escala original. O T4 - água de fumaça aumenta a probabilidade de germinação em aproximadamente 3% em relação ao Controle. A variabilidade entre as repetições (sd(Intercept)) foi estimada em 0,40, com um intervalo de credibilidade de 95% que não inclui zero (0,13 a 1,28), indicando que há variação significativa entre as repetições, atribuída à heterogeneidade natural das sementes (diferenças de tamanho e maturidade) (Figura 3). Portanto, essa superdispersão nos dados e a adequação do modelo beta-binomial foi demonstrada através do parâmetro de dispersão (ϕ), estimado em 2,78 (IC 95%: 2,61 a 2,96) (Tabela 3, Figura 4). Em relação ao Índice de Velocidade de Germinação (IVG), o tratamento T4 - água de fumaça, destacou-se com o maior IVG médio (14), portanto, o tratamento T4 (água de fumaça) mostrou-se o mais eficiente para promover maior velocidade de germinação (Tabela 2).

4. Discussão

4.1 Inferência Bayesiana na Análise de Germinação

Os dados de germinação, por sua natureza binária (onde cada semente representa um evento Bernoulli: germinou=1 ou não=0), seguem intrinsecamente uma distribuição binomial - não normal. Mesmo assim, apesar

dos avanços nos métodos estatísticos, a análise de germinação ainda é amplamente baseada em ANOVA (ver Sileshi, 2012 para uma revisão), exigindo transformações quando os dados violam os pressupostos básicos dos testes tradicionais (normalidade e homocedasticidade). Mesmo os testes não paramétricos (como Kruskal-Wallis e Mann-Whitney), possuem suas próprias limitações - incluindo a necessidade de homogeneidade de variâncias. Esses problemas se agravam em estudos com pequeno número de réplicas ($n < 5$), onde tanto a ANOVA quanto os testes não paramétricos apresentam altas taxas de erro (Sileshi, 2012).

A natureza binária dos dados de germinação impõe dois desafios estatísticos: (1) a variância é naturalmente heterogênea, atingindo seu máximo próximo a 50% de germinação e diminuindo nas extremidades (0% ou 100%); e (2) testes tradicionais de homocedasticidade (como Levene, Cochran e Bartlett) são inadequados nesse contexto. No presente trabalho, optou-se pela distribuição beta-binomial, que se mostrou melhor adequada para modelar dados de contagem com superdispersão, onde a variabilidade entre as repetições é maior do que a esperada em um modelo binomial tradicional, como os observados em experimentos de germinação (Sileshi, 2012).

Portanto, a modelagem bayesiana aqui adotada mostrou-se boa solução para os problemas dos métodos clássicos na análise de dados binomiais (Sileshi, 2012; Nikitin et al., 2019). Diferentemente da ANOVA e GLMs tradicionais - que exigem transformações problemáticas (como arco-seno) dos dados proporcionais - a abordagem bayesiana permite modelar diretamente a distribuição binomial sem distorções, superando a instabilidade com amostras pequenas e os problemas de superdispersão. A inferência bayesiana estabiliza as estimativas mesmo com poucas réplicas. Além disso, sua estrutura hierárquica naturalmente acomoda variâncias heterogêneas entre tratamentos, correlações entre observações e problemas de pseudorreplicação. Os intervalos de credibilidade aqui obtidos são análogos bayesianos aos intervalos de confiança, e forneceram uma interpretação mais intuitiva e direta da incerteza nas estimativas de germinação (Kruschke e Liddell, 2018).

4.2 *Dormência, Fumaça e a Germinação em Euterpe precatória*

Como em outras espécies, a germinação em *Arecaceae* inicia-se com a absorção de água, seguida pela retomada do crescimento do embrião quiescente e culminando na emergência radicular. Esse processo envolve uma série de eventos metabólicos distintos, que resultam na expansão do embrião até a formação de uma plântula (Henderson, 2006). Fatores como água, luz, solo e temperatura podem influenciar direta ou indiretamente a germinação, sendo a temperatura um dos mais críticos, pois afeta não apenas a velocidade e a quantidade de sementes germinadas, mas também a eficiência da quebra de dormência do banco de sementes (Bewley e Black, 1985; Ooi et al., 2014).

A ocorrência de dormência em sementes de palmeiras é diversa e depende das características fisiológicas e morfológicas de cada espécie (Lopes et al., 2011). Métodos como escarificação mecânica ou química são frequentemente utilizados para romper o tegumento duro das sementes, facilitando a absorção de água e a entrada de gases essenciais para a germinação (Baskin e Baskin, 2014). A imersão em água quente ou a exposição a temperaturas elevadas por curtos períodos também são eficazes, especialmente para espécies adaptadas a ambientes sujeitos a incêndios. A combinação de tratamentos, como escarificação seguida de imersão em água ou soluções químicas, também é recomendada para otimizar a germinação em sementes recalcitrantes ou com dormência profunda (Pivetta et al., 2005).

A maioria das espécies vegetais apresenta maior percentual de germinação em temperaturas ambientes entre 25-30°C, embora algumas exijam temperaturas mais elevadas devido a características específicas (Ooi et al., 2014). Espécies de ecossistemas dependentes do fogo exibem adaptações específicas (Keeley et al., 2011). Entretanto, independente do ecossistema, existe um intervalo ótimo de temperatura no qual a germinação ocorre de forma mais rápida e eficiente (Souza et al., 2007; Rodrigues-Junior et al., 2016). Processos germinativos acelerados, acompanhados pela emergência precoce das plântulas, são altamente desejáveis para o estabelecimento das espécies e, também, na produção de mudas, uma vez que a permanência prolongada da plântula nos estágios iniciais de desenvolvimento ou sua emergência tardia no solo pode torná-la mais suscetível às condições ambientais adversas, comprometendo seu desenvolvimento (Pivetta et al., 2005).

A fumaça gerada pelo fogo pode acelerar a germinação e o desenvolvimento das plântulas (Blank e

Young, 1998; Baker et al., 2005; Moreira et al., 2010; Flematti et al., 2011). Esse efeito é atribuído às moléculas de butenolida e karrikinolidas, que promovem a germinação e regulam o crescimento e o desenvolvimento das plantas (Flematti et al., 2004; Nelson et al., 2009). Os compostos químicos da fumaça atuam como gatilhos para a germinação em condições pós-fogo (Van Staden et al., 2000; Nelson et al., 2012). Esses componentes da fumaça estão principalmente relacionados ao estabelecimento e à sobrevivência das plântulas em ambientes pós-fogo (Keeley e Fotheringham, 1998; Van Staden et al., 2000).

O efeito combinado de altas temperaturas e água de fumaça varia entre as espécies, podendo estimular ou inibir a germinação (Moreira et al., 2010; González et al., 2011; King e Menges, 2017). Altas temperaturas (próximas de 200°C) por curtos períodos (choque térmico de 3 minutos, como a utilizada no presente trabalho) podem induzir a quebra de dormência, mas exposições prolongadas podem levar à morte das sementes (Gashaw e Michelsen, 2002; Rodrigues-Junior et al., 2016). Entre as espécies de *Arecaceae* já estudadas envolvendo o uso de água de fumaça na germinação, todos resultados mostraram efeito positivo, ou aumentando a taxa de germinação ou reduzindo o tempo até a germinação (quebra de dormência). Embora a maioria dos estudos não especifique a temperatura, somente o tratamento de água de fumaça foi suficiente para produzir os efeitos positivos, também para o presente estudo, com *Euterpe precatoria*.

O tempo até o melhor desempenho da germinação encontrado no presente trabalho, próximo dos 70 dias após a sementeira, é semelhante ao encontrado em outros estudos com *Euterpe* spp. (Gama et al., 2010). Tarqui et al. (2024) embora não tenham usado água de fumaça como tratamento, encontraram que a aplicação da temperatura de 59°C por 16 minutos como tratamento pré-germinativo de *E. precatoria*, influenciou positivamente a germinação, aumentando a porcentagem final em relação ao controle.

Os resultados obtidos no presente estudo reforçam, portanto, a importância da fumaça como fator promotor da germinação. O tratamento T4 - água de fumaça - demonstrou um efeito positivo e significativo, indicando que a água de fumaça aumentou em 3% a probabilidade de germinação em comparação com o Tratamento controle. Esses achados corroboram a hipótese de que compostos da fumaça podem atuar como estímulos para a germinação em condições pós-fogo, embora a interação com altas temperaturas possa variar entre espécies.

O resultado é particularmente relevante, tanto no aspecto da produção de mudas para plantios de enriquecimento no manejo florestal, quanto no contexto da ocorrência do fogo em ecossistemas pirofóbicos, haja visto o incremento da frequência e severidade dos incêndios no âmbito das mudanças climáticas globais, que afetam o solo e o banco de sementes, além da microbiota e da fauna local, comprometendo a regeneração natural da floresta (Thomas et al., 2010). Da mesma forma, os dados podem subsidiar estratégias de regeneração natural pós-fogo, na definição de áreas prioritárias e no planejamento da gestão territorial em prol da conservação da biodiversidade. Seu contexto de uso pode ainda se estender servindo como base técnica para regulamentação ambiental, silvicultura adaptativa, bioprospecção e recuperação de funções ecossistêmicas.

5. Conclusão

A água de fumaça foi eficaz na quebra da dormência e no estímulo à germinação de *Euterpe precatoria*. 120°C e 180°C não afetaram significativamente a germinação (75-83%, semelhante ao controle). 240°C foi letal (*Seed Thermal Death*), inibindo completamente a germinação. A água de fumaça promoveu a maior taxa de germinação (90%) e o maior IVG (14), superando o controle (IVG = 10) sendo que o modelo bayesiano confirmou esse efeito positivo (aumento de ~3% na germinação). Esses resultados contribuem para entender a resiliência das sementes em ecossistemas pirofóbicos sujeitos a incêndios e mudanças climáticas, além de auxiliar na produção de mudas para reflorestamento.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Acre pelo apoio institucional e aos auxiliares de campo, colaboradores e demais colegas do LEEV pelo apoio em todas as fases da pesquisa.

7. Referências

- Abedi, M., Zaki, E., Erfanzadeh, R., & Naqinezhad, A. (2018). Germination patterns of the scrublands in response to smoke: The role of functional groups and the effect of smoke treatment method. **South African Journal of Botany**, 115, 231-236. DOI:10.1016/j.sajb.2017.03.010
- Baker, K.S., Steadman, K.J., Plummer, J.A., & Dixon, K.W. (2005). Seed dormancy and germination responses of nine Australian fire ephemerals. **Plant and Soil**, 277(1-2), 345-358. DOI:10.1007/s11104-005-7971-9
- Baskin, C.C., & Baskin, J.M. (2014). **Seeds: Ecology, Biogeography, and Evolution of Dormancy and Germination** (2nd ed.). Academic Press.
- Bewley, J.D., & Black, M. (1985). **Physiology and Biochemistry of Seeds (Vol. 1)**. Springer-Verlag.
- Blank, R.R., & Young, J.A. (1998). Heated substrate and smoke: Influence on seed emergence and plant growth. **Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management**, 51(5), 577-583. DOI: 10.2307/4003379
- Çatav, Ş.S., Küçükakyüz, K., Akbaş, K., & Tavşanoğlu, Ç. (2015). Effects of aqueous smoke and nitrate treatments on germination of 12 eastern Mediterranean Basin plants. **Annales Botanici Fennici**, 52(1-2), 93-100. DOI:10.5735/085.052.0211
- Charlo, H.C.O., Môro, F.V., Silva, V.L., Silva e Silva, B.M., Bianco, S., & Môro, J.R. (2006). Aspectos morfológicos, germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de *Archontophoenix alexandrae* (F.Mueller) H.Wendl e Drude (Arecaceae) em diferentes substratos. **Revista Árvore**, 30(6), 933-940. DOI:10.1590/S0100-67622006000600008
- Cipriani, V.B., Calvi, G.P., & Ferraz, I.D.K. (2023). Thermal optima for seed germination of 30 tree species from Central Amazonia: A comparison of approaches and a new proposal. **Seed Science and Technology**, 51(3), 435-456. DOI: 10.15258/sst.2023.51.3.13
- Cunha, A.C.C., & Jardim, M.A.G. (1995). Avaliação do potencial germinativo em açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) variedades preto, branco e espada. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi – Série Botânica**, 11(1), 55-60. Disponível em: <https://biostor.org/reference/292814>
- Ferraz, I.D.K., Arruda, Y.M.B.C., & Van Staden, J. (2013). Smoke-water effect on the germination of Amazonian tree species. **South African Journal of Botany**, 87, 122-128. DOI:10.1016/j.sajb.2013.04.004
- Ferreira, S.A.N., & Gentil, D.F.O. (2006). Extração, embebição e germinação de sementes de tucumã (*Astrocaryum aculeatum*). **Acta Amazônica**, 36(2), 141-146. DOI: 10.1590/S0044-59672006000200002
- Ferreira, S.A.N., Castro, A.F., & Gentil, D.F.O. (2010). Emergência de plântulas de tucumã (*Astrocaryum aculeatum*) em função do pré-tratamento das sementes e da condição de semeadura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 32(4), 1189-1195. DOI: 10.1590/S0100-29452011005000011
- Ferreira, K.B., Silva, L.M., Ribeiro, L.M., & Oliveira, T.G. (2021). Germination of palm seeds under periods of rehydration. **Ornamental Horticulture**, 27(4), 446-452. DOI: 10.1590/2447-536x.v27i4.2303

- 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(2), 181-187. DOI:10.1111/btp.12276
- Flematti, G.R., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W., & Trengove, R.D. (2004). A compound from smoke that promotes seed germination. **Science**, 305(5686), 977. DOI: 10.1126/science.1099944
- Galotta, A.L.Q.A., & Boaventura, M.A.D. (2016). Constituintes químicos da raiz e do talo da folha do açaí (*Euterpe precatoria* Mart., Areaceae). **Química Nova**, 28(4), 610-613. DOI: 10.1590/S0100-40422005000400011
- Gama, J.S.N., Monte, D.M.O., Alves, E.U., Bruno, R.L.A., & Junior, J.M.B. (2010). Temperaturas e substratos para germinação e vigor de sementes de *Euterpe oleracea* Mart. **Revista Ciência Agronômica**, 41(4), 664-670. DOI:10.1590/S1806-66902010000400021
- Gashaw, M., & Michelsen, A. (2002). Influence of heat shock on seed germination of plants from regularly burnt savanna woodlands and grasslands in Ethiopia. **Plant Ecology**, 159(1), 83-93. DOI:10.1023/A:1015536900330
- Gómez-González, S., Torres-Díaz, C., & Gianoli, E. (2011). The effects of fire-related cues on seed germination and viability of *Helenium aromaticum* (Hook.) HL Bailey (Asteraceae). **Gayana Botánica**, 68(1), 86-88.
- Henderson, F.M. (2006). Morphology and anatomy of palm seedling. **The Botanical Review**, 72(4), 273-329. DOI: 10.1663/0006-8101(2006)72[273:MAAOPS]2.0.CO;2
- Jäger, A.K., Light, M.E., & Van Staden, J. (1996). Effects of source of plant material and temperature on the production of smoke extracts that promote germination of light-sensitive lettuce seeds. **Environmental and Experimental Botany**, 36(4), 421-429. DOI:10.1016/S0098-8472(96)01024-6
- Keeley, J.E., & Fotheringham, C.J. (1998). Smoke-induced seed germination in California chaparral. **Ecology**, 79(7), 2320-2336. DOI:10.2307/176825
- Keeley, J.E., & Fotheringham, C.J. (2000). Role of fire in regeneration from seed. In M. Fenner (Ed.), **Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities** (pp. 311-330). CAB International.
- 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 in Plant Science**, 16(8), 406-411. DOI:10.1016/j.tplants.2011.04.002
- King, R.A., & Menges, E.S. (2018). Effects of heat and smoke on the germination of six Florida scrub species. **South African Journal of Botany**, 115, 223-230. DOI:10.1016/j.sajb.2017.03.009
- Kristiansen, T., Svenning, J.C., Eiserhardt, W.L., Pedersen, D., Brix, H., Munch Kristiansen, S., Knadel, M., & Grández, C. (2011). Local and regional palm (Areaceae) species richness patterns and their cross-scale determinants in the western Amazon. **Journal of Ecology**, 99(4), 1001-1015. DOI:10.1111/j.1365-2745.2011.01834.x
- Kruschke, J.K., & Liddell, T.M. (2018). Bayesian data analysis for newcomers. **Psychonomic Bulletin & Review**, 25(1), 155-177. DOI: 10.31234/osf.io/nqfr5

- Lopes, P.S.N., Silva, M.L.M., Alves, E.U., & Bruno, R.L.A. (2011). Tratamentos físicos e químicos para superação de dormência em sementes de *Butia capitata* (Martius) Beccari. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, 41(2), 12-125. DOI: 10.5216/pat.v41i1.8388
- Lorenzi, H., Souza, H.M., Costa, J.T.M., Cerqueira, L.S.C., & Ferreira, E. (2004). **Palmeiras Brasileiras e Exóticas Cultivadas**. Instituto Plantarum de Estudos da Flora.
- Maguire, J.D. (1962). Speed of germination - Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, 2(2), 176-177. DOI:10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x
- Mojzes, A., Csontos, P., & Kalapos, T. (2015). Is the positive response of seed germination to plant-derived smoke associated with plant traits?. **Acta Oecologica**, 65, 24-31. DOI:10.1016/j.actao.2015.05.001
- Moreira, B., & Pausas, J.G. (2018). Shedding light through the smoke on the germination of Mediterranean Basin flora. **South African Journal of Botany**, 115, 244-250. DOI: 10.1016/j.sajb.2016.10.008
- 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(4), 627-635. DOI:10.1093/aob/mcq017
- Motta, G.S.T., Fidelis, A., & Pausas, J.G. (2024). Smoke effects on the germination of Cerrado species. **Plant Ecology**, 225(7), 685-693. DOI: 10.1007/s11258-024-01427-4
- Moussa, H., Margolis, H.A., Duponnois, R., & Gagnon, J. (1998). Factors affecting the germination of doum palm (*Hyphaene thebaica* Mart.) seeds from the semi-arid zone of Niger, West Africa. **Forest Ecology and Management**, 104(1-3), 27-41. DOI:10.1016/S0378-1127(97)00230-2
- Nelson, D.C., Riseborough, J.A., & Flematti, G.R. (2009). Karrikins discovered in smoke trigger Arabidopsis seed germination by a mechanism requiring gibberellic acid synthesis and light. **Plant Physiology**, 149(2), 863-873. DOI: 10.1104/pp.108.131516
- Nelson, D.C., Flematti, G.R., Ghisalberti, E.L., Dixon, K.W., & Smith, S.M. (2012). Regulation of seed germination and seedling growth by chemical signals from burning vegetation. **Annual Review of Plant Biology**, 63, 107-130. DOI: 10.1146/annurev-arplant-042811-105545
- Nikitin, A., Kolesnikov, A., & Hvatov, A. (2019). Bayesian optimization for seed germination. **Plant Methods**, 15, 1-10. DOI: 10.1186/s13007-019-0422-z
- Ooi, M.K.J., Denham, A.J., Santana, V.M., & Auld, T.D. (2014). Temperature thresholds of physically dormant seeds and plant functional response to fire: Variation among species and relative impact of climate change. **Ecology and Evolution**, 4(5), 656-671. DOI:10.1002/ece3.973
- Pivetta, K.F.L., Casali, L.P., Cintra, G.S., Pedrinho, D.R., Pizetta, P.U.C., Pimenta, R.S., & Mattiuz, C.F.M. (2005). Efeito da temperatura e do armazenamento na germinação de sementes de *Thrinax parviflora* Swartz. (Arecaceae). **Científica**, 33(2), 178-184. DOI:10.15361/1984-5529.2005v33n2p178%20-%20184
- Queiroz, M.S.M., & Bianco, R. (2009). Morfologia e desenvolvimento germinativo de *Oenocarpus bacaba* Mart. (Arecaceae) da Amazônia Ocidental. **Revista Árvore**, 33(6), 1037-1042. DOI:10.1590/S0100-67622009000600006

R Core Team. (2016). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>

Ren, L., Bai, Y., & Reaney, M. (2017). Evidence of different compounds in smoke derived from legumes and grasses acting on seed germination and seedling emergence. **Seed Science Research**, 27(2), 154-164. DOI: 10.1017/S0960258517000113

Ribeiro, A.G. (1977). O clima do Estado do Acre. **Boletim Geográfico**, 35, 112-114.

Rodrigues-Junior, A.G., Oliveira, T.G., Silva, E.A.A., & Davide, A.C. (2016). Temperature effects on *Acrocomia aculeata* seeds provide insights into overcoming dormancy in neotropical savanna palms. **Flora**, 223, 30-37. DOI:10.1016/j.flora.2016.04.011

Santana, D.G., & Ranal, M.A. (2004). **Análise de germinação, um enfoque estatístico**. Brasília, DF. Universidade de Brasília. 247p.

Souza, J.R.P., Silva, L.M., & Oliveira, T.G. (2007). Tempo de armazenamento e temperatura na porcentagem e velocidade de germinação das sementes de camomila. **Ciência Rural**, 37(4), 982-986. DOI:10.1590/S0103-84782007000400010

Souza, A.M.B., Ribeiro, L.M., & Oliveira, T.G. (2022). Temperatures and light regimes in the germination of *Areca vestiaria* and *Areca triandra* seeds. **Revista Ceres**, 69(5), 619-627. DOI: 10.1590/0034-737x202269050016

Tarqui, C.E.C., Porres, J.J.A., & Bonilla, L.C. (2024). Efecto de cuatro tratamientos pregerminativos en semillas de asaí (*Euterpe precatoria* Martius) e majo (*Oenocarpus bataua* Martius). **CIBUM SCIENTIA**, 3(2), 53-58. DOI: 10.53287/ztxj5815zn90v

Thomas, P.B., Morris, E.C., Auld, T.D., & Haigh, A.M. (2010). The interaction of temperature, water availability and fire cues regulates seed germination in a fire-prone landscape. **Oecologia**, 162(2), 293-302. DOI: 10.1007/s00442-009-1456-0

Van Staden, J., Jäger, A.K., Light, M.E., & Burger, B.V. (2000). Smoke as a germination cue. **Plant Species Biology**, 15(2), 167-178. DOI:10.1046/j.1442-1984.2000.00037.x

Zahed, M., & Bączek-Kwinta, R. (2023). The impact of post-fire smoke on plant communities: A global approach. **Plants**, 12(22), 3835. DOI:10.3390/plants12223835

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. DOI:10.1016/j.flora.2019.03.007