



**UnB**

Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Biológicas

Programa de Pós-graduação em Ecologia

## **Ecologia de sementes e plântulas aplicada à restauração por semeadura direta no Brasil**

**Maxmiller Cardoso Ferreira**



Brasília-DF

Agosto de 2024



**UnB**

Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Biológicas

Programa de Pós-graduação em Ecologia

# **Ecologia de sementes e plântulas aplicada à restauração por semeadura direta no Brasil**

**Maxmiller Cardoso Ferreira**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ecologia da Universidade de Brasília, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ecologia.

**Orientador:** Prof. Dr. Daniel Luis Mascia Vieira

Brasília-DF

Agosto de 2024



# UnB

Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Biológicas

Programa de Pós-graduação em Ecologia



*Pouteria torta* (Mart.) Radlk. A guapeva-do-cerrado é uma das árvores mais imponentes dos cerrados, cerradões e matas onde cresci. Adorava pescar escorado em uma guapeva, que ficava na beira de um remanso d'água, na curva do rio que serpenteava no fundo de casa. Os peixes cevados de frutas e bichinhos abundavam naquele remanso. Lambari, piau, pianpara, mandi, cachorra, traíra e até um bagrinho chamado guapeva. Como pode um pé de pau dar nome ao peixinho? Tinha tanta fartura de mato e cerrado que jamais botei reparo nas filhinas de guapeva que brotavam do espesso folhiço acamado debaixo dela. Agora, naquelas matas e cerrados onde cresci, pouco restou do que antes abundava em frutas e bichos. O guloso brocador de mato, o bicho-homem, devastou quase tudo o que havia ali. Mas repare só, podemos plantar essas danadas de volta na casa delas. Essas da foto germinaram todinhas. Tirei elas dos frutos e cobri com o espesso folhiço que estava debaixo da guapeva. Uns 30 a 45 dias depois, guardadinhas, quentinhas e bem molhadas com as águas de 2023, germinaram todinhas. Depois, transplantei para um capãozinho de mato e bem lá elas ficaram.

## **Banca Examinadora**

**Presidente** – Prof. Dr. Daniel Luis Mascia Vieira<sup>12</sup>

**Membro externo** – Prof. Dr. Daniel Roberto Pérez<sup>3</sup>

**Membro externo** – Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Giselda Durigan<sup>4</sup>

**Membro interno** – Prof. Dr. Fabian Borghetti<sup>5</sup>

**Suplente** – Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Isabel Belloni Schmidt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Ecologia

<sup>2</sup>Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia

<sup>3</sup>Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ciencias del Ambiente y la Salud,  
Laboratorio de Rehabilitación y Restauración Ecológica

<sup>4</sup>Instituto de Pesquisas Ambientais do Estado de São Paulo, Floresta Estadual de Assis

<sup>5</sup>Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Biológicas, Departamento de Botânica

## **Restauração Ecológica**

A restauração ecológica é um empreendimento humano que visa o retorno da autossuficiência regenerativa de uma área. O método escolhido para isso depende do nível de regeneração natural, dos objetivos do projeto e do contexto social e econômico.

Meu método de restauração preferido é aquele em que a chuva de sementes, o banco de sementes e o banco de gemas resolve o problema que criamos, restaurando os processos regenerativos. Mas quando a regeneração natural não consegue sozinha, devemos intervir com mais energia. O plantio de estacas, o plantio de mudas, a transferência da camada superficial do solo, a transferência de propágulos vegetativos e a semeadura direta podem ajudar nessa empreitada. Métodos que sempre devem estar integrados com o manejo adaptativo. Cada método tem suas vantagens e desvantagens, seu contexto de utilização e suas limitações. Eles podem inclusive se complementar com o objetivo final da restauração ecológica.

Na tese, estudei as limitações da semeadura direta e indiquei estratégias de manejo para aprimorá-la. Para isso, usei a caixa de ferramentas da ecologia aplicada, da ecologia da intervenção e da ecologia da restauração. Com esse ferramental, investiguei as fases mais restritivas para o recrutamento de plântulas, as técnicas de manejo que mais afetam o sucesso de estabelecimento e as características das sementes e plântulas mais vantajosas e aquelas que são restringidas pela semeadura direta. Depois, busquei soluções na literatura e na prática para aliviar os filtros que restringem as espécies e os grupos funcionais. Espero ter contribuído para essa empreitada.

## **Agradecimentos**

Primeiramente, agradeço à Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-graduação em Ecologia por proporcionar um ensino público de excelência, gratuito e fundamental para nossa formação acadêmica e profissional. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, 88887.499145/2020-00) e ao Ministério da Educação, por me possibilitar desenvolver esta tese através do financiamento da bolsa de estudo. Por fim, agradeço à Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia por proporcionar a estrutura e as condições necessárias para o desenvolvimento desta tese.

Agradeço aos autores originais dos trabalhos revisados na tese. Considero que a ciência é como um rio, onde cada pesquisador contribui como um braço menor de água, que vai escorrendo vagarosamente para os braços maiores. Os braços maiores são, portanto, uma propriedade emergente dos muitos, sendo muito mais que a soma das partes. Precisamos ser humildes e celebrar aqueles que vieram antes de nós e os que vieram antes deles. Aprendi muito lendo e tabulando os trabalhos de vocês. Muitos de vocês eu nem conheço pessoalmente. Muitos outros eu conheço, e como os admiro.

Agradeço ao amigo e orientador Daniel Vieira, estamos há tanto tempo juntos matutando a restauração que, quando um fala, o outro costuma completar a frase. Grato demais por toda paciência, confiança, ensinamentos e oportunidades. Agradeço ao amigo e eterno orientador Hélder Consolaro. Você me alçou à carreira acadêmica desde os primeiros meses da graduação. Vocês são muito importantes nesta história.

Agradeço aos amigos e companheiros de Embrapa, Anderson Sevilha, Bruno Walter e Marcelo Medeiros, por todas as prosas boas, ensinamentos e sugestões para essa e outras pesquisas que toquei. Agradeço também pela companhia na luta em defesa da democracia, por igualdade e por justiça social. Vamos que vamos!!!

Agradeço demais a Dulce Silva, da Embrapa, por todos os dados gerados no laboratório, por todas as dicas e sugestões sobre características funcionais, pela prosa boa e alegre. Compartilho contigo o grande amor pelas plantas pequenas e suas belezas. Também aos bolsistas de Iniciação Científica Anna Maia, Elgênia Jorge e Pedro Laumann, pela assistência na coleta de dados laboratoriais. Muitas das sementinhas medidas e germinadas por vocês compuseram a tese.

Agradeço também às companheiras e companheiros de laboratório Arllen Paumgarten, Ícaro Abreu, Natanna Horstmann, Silvia Rodrigues, Henrique Marques,

Viviane Abreu, Jessica Chamusca, Pedro Santos, Ligiane Bessa e Marcos Ataíde, por todas as contribuições e trocas de ideias ao longo dos últimos anos.

Sou muito grato aos companheiros muvuqueiros Eduardo Campos-Filho, Edézio Miranda, Gustavo Rocha, Laura Antoniazzi, Matheus Correia, Monique Alves, João Pereira e Lara Costa pelo envio de sementes, dados, fotos e sugestões sobre sementes, plântulas e a restauração com semeadura direta. Também agradeço a Barbara Pacheco, Henrique Andrade, Gustavo Paiva, Ricardo Haidar e Thiago Nogueira por compartilharem generosamente sua experiência de campo.

Sou grato a Aldicir Scariot, Anabele Gomes, Ana Wiederhecker, Alexandre Sampaio, Fatima Piña-Rodrigues, Felipe Ribeiro, Ingo Isernhagen, Ivonir Piotrowski, Paola Raupp, Cássia Munhoz, Fabian Borghetti, Fernando Silveira, Isabel Schmidt, Ícaro Abreu, Luciano Bianchetti, Marcelo Simon, Mateus Silva, Murilo Dias, Sérgio Noronha e Bárbara Zimbres pelas sugestões valiosas ao trabalho.

Agradeço ao meu pai, Vandelino Ribeiro de Paiva, por me ensinar sobre honra, simplicidade e cuidado. Agradeço também à bisa, Maria Cunha, que me ensinou a língua das plantas e dos bichos. Vocês já se foram, mas moram eternamente no meu coração.

Agradeço demais à minha mãe, Maria Aparecida Cardoso Ferreira, e à minha avó, Valdira Vaz Ferreira, por toda luta e carinho para que eu chegasse até aqui. Vocês me ensinaram a lida da roça, a força das plantas e dos bichos. E sempre disseram: “estudem, pois as oportunidades que não tivemos, você e seus irmãos têm agora”. Vocês fizeram um esforço danado e correram atrás das políticas públicas para que eu e meus irmãos pudessemos estudar. Vocês duas foram as minhas primeiras professoras.

Agradeço demais aos meus irmãos Daniella Cardoso de Paiva, Monique Cardoso de Almeida, Marlon Brando Cardoso de Andrade e Karolayne Cardoso Fernandes, por toda parceria, incentivo, companheirismo e amor. Juntos, compartilhamos o desejo de construir um mundo melhor.

Agradeço à minha sogra, Vera Lúcia, por todo o cuidado e carinho. Compartilhamos o amor pelo Cerrado, esse ‘ser-tão’ único, mágico e sagrado.

Por fim, agradeço demais a Sílvia Borges, minha companheira, que revisou todo o texto carinhosamente. Ninguém mais do que você ouviu a prosa dessa tese. Agradeço por compartilhar comigo a vida, a esperança e a crença em um mundo mais justo e fraterno. Compartilhamos o amor pela Ana Terra, nossa filhinha que chegou durante o doutorado. Também agradeço à Ana Terra por trazer tanta paz e alegria para nossas vidas.

*“No Cerrado há só dois tempos, o tempo da lenha seca e o tempo da lenha molhada.”*

Maria Cunha

*“Depois que as águas retornam ao Cerrado, é preciso paciência e esperar a febre da terra passar, para depois plantar, seja semente, rama ou raiz.”*

Valdira Vaz

*“Muitas vezes você planta e não colhe, mas só colhe de verdade quem plantou.  
Devemos ensinar a plantar.”*

Maria Cardoso

*Dedico a todas as Caboclas e Caboclos, que na dura lida da vida, lutam por dias melhores para seus filhos. Curvados e cansados por carregar o Brasil nas costas. Mãos surradas e os pés rachados, mas sempre com honra, amor e esperança.*



# Sumário

Lista de figuras.....	12
Lista de tabelas.....	14
Resumo da tese .....	15
Thesis abstract.....	17
Introdução geral .....	19
CAPÍTULO 1 - O nexa entre o tamanho da semente, a germinação, a emergência e o estabelecimento das plântulas e novas métricas para o sucesso da restauração por semeadura direta.....	23
Resumo .....	24
Abstract.....	26
I. Introdução .....	28
II. Materiais e métodos.....	31
(1) Busca e seleção dos estudos.....	31
(2) Extração e curadoria dos dados .....	32
(3) Preparação e análise dos dados.....	33
(a) Perda de sementes (ou transições) em cada fase de estabelecimento.....	33
(b) Relações entre as fases de estabelecimento.....	33
(c) Métricas de sucesso da semeadura direta .....	33
(d) Como as métricas de sucesso são afetadas pelo tamanho da semente?.....	36
III. Resultados.....	38
(1) Qual é a porcentagem de perda de sementes em cada fase de estabelecimento? .....	38
(2) Relação entre as métricas de sucesso da semeadura direta.....	41
(3) Métricas de sucesso e sua relação com o tamanho da semente .....	41
IV. Discussão.....	44
(1) A perda de sementes não pode ser considerada alta na semeadura direta .....	44
(2) A germinabilidade inicial da semente tem o impacto mais significativo no estabelecimento .....	45
(3) A germinabilidade do lote de sementes não prevê o estabelecimento no campo .....	47
(4) A emergência no campo causa o segundo impacto mais significativo no estabelecimento .....	49
(5) Formação do banco de sementes .....	49
(6) A sobrevivência é relativamente alta na semeadura direta .....	50

(7) Houve uma relação fraca de $E_{germ}$ , $E_g$ e $E_{USS}$ com $E_{semente}$ .....	51
(8) Relação das métricas de sucesso propostas com o tamanho da semente.....	52
(9) Limitações deste estudo e dos estudos analisados .....	53
(10) Limitações da semeadura direta para a restauração da biodiversidade.....	53
V. Conclusões.....	54
VI. Informações suplementares - Capítulo 1 .....	55
<b>CAPÍTULO 2 - Aproveitando ao máximo as sementes nativas: as técnicas de manejo interagem com as características das sementes e plântulas para aumentar o sucesso da semeadura direta.....</b>	
Resumo .....	57
Abstract.....	58
I. Introdução .....	59
II. Materiais e métodos .....	65
(1) Pesquisa e seleção de literatura.....	65
(2) Extração e curadoria de dados .....	66
(3) Preparação da variável de resposta: porcentagem de estabelecimento aos 12 meses.....	66
(4) Seleção de técnicas de manejo preditoras.....	67
(5) Seleção de características funcionais preditoras .....	68
(6) Análise de dados .....	68
III. Resultados.....	72
IV. Discussão.....	73
(1) Os tratamentos de pré-germinação usados em laboratório ou viveiro não devem ser adotados automaticamente na semeadura direta.....	74
(2) Enterrar sementes é uma técnica altamente eficaz.....	75
(3) A cobertura morta é uma técnica complementar ao enterro preciso de sementes .....	76
(4) A fertilização reduz o estabelecimento de espécies de savana .....	76
(5) O adubo verde ou as plantas agrícolas facilitam o estabelecimento.....	77
(6) O controle de plantas daninhas após a semeadura direta é essencial.....	78
(7) O dossel ou a cobertura de plantas agrícolas e de adubação verde são benéficos .....	79
V. Conclusões.....	81
VI. Informações suplementares - Capítulo 2 .....	82

CAPÍTULO 3 - Características funcionais das sementes e plântulas que explicam o sucesso de emergência, sobrevivência e estabelecimento na semeadura direta tropical.....	83
Resumo .....	84
Abstract.....	86
I. Introdução .....	88
II. Material e métodos.....	104
(1) Busca e seleção dos estudos.....	104
(2) Extração e curadoria dos dados .....	105
(3) Preparação das variáveis resposta.....	105
(4) Preparação das variáveis preditoras .....	106
(5) Análise dos dados .....	107
III. Resultados.....	107
(1) Associação entre as características das sementes e plântulas .....	107
(2) Características das sementes e plântulas que explicam a emergência .....	108
(3) Características das sementes e plântulas que explicam a sobrevivência .....	109
(4) Características das sementes e plântulas que explicam o estabelecimento .....	109
IV. Discussão.....	114
(1) A massa da semente foi a característica mais importante para montagem da comunidade.....	115
(2) O estabelecimento de plântulas foi positivamente relacionado com a longevidade das sementes. 117	
(3) A dormência foi uma característica chave para entender as diferenças no estabelecimento de plântulas .....	119
(4) Sementes planas, anemocóricas e zoocóricas apresentaram menor previsibilidade no estabelecimento de plântulas .....	121
(5) Plântulas com cotilédones de reserva tiveram maior sucesso de emergência .....	122
(6) O paradoxal efeito da velocidade de crescimento sobre a emergência.....	123
(7) A zona de vida bioclimática foi um importante preditor para a sobrevivência .....	124
V. Conclusões.....	125
VI. Informações suplementares - Capítulo 3 .....	127
Conclusões gerais.....	128
Apêndice .....	137
Referências bibliográficas da tese.....	159

## Lista de figuras

### - Capítulo 1 -

**Figura 1:** Regressões lineares de efeito misto entre a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro, a emergência no campo e o estabelecimento aos 6, 12, 24 e 36 meses. Caixas tracejadas: germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro. Caixas pretas sólidas: emergência e estabelecimento em campo. Caixas cinza: Sobrevivência geral em uma fase: indivíduos vivos em uma fase/sementes semeadas  $\times 100$ ; (indivíduos vivos em uma fase/sementes germináveis semeadas  $\times 100$ ); [I.C. 95% de sobrevivência geral]..... 39

**Figura 2:** Regressões lineares de efeitos mistos entre a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro, a emergência no campo e o estabelecimento. (A) Emergência e germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro. (B) Estabelecimento aos 12 meses e emergência. (C) Estabelecimento aos 24 meses e estabelecimento aos 12 meses. No painel A, a linha e os pontos em laranja indicam as observações que tiveram maior emergência no campo do que a germinabilidade do lote de sementes. No painel B, a linha vertical (sobrevivência) indica a sobrevivência das plântulas no primeiro ano, calculada como o estabelecimento aos 12 meses dividido pela emergência  $\times 100$ . No painel C, a linha vertical (sobrevivência) indica a sobrevivência da planta no segundo ano, que é o estabelecimento aos 24 meses/estabelecimento aos 12 meses  $\times 100$ ..... 40

**Figura 3:** Frequência de espécies por métricas de sucesso e a relação entre métricas de sucesso e a métrica usual ( $E_{\text{semente}}$ ). (A) Frequência de espécies em relação a  $E_{\text{semente}}$  e  $E_{\text{germ}}$ . As curvas de frequência foram comparadas por um modelo linear generalizado de efeitos mistos (Família Gamma), assumindo cada espécie como um efeito aleatório. (B) Correlação entre  $E_{\text{germ}}$  e  $E_{\text{semente}}$ . (C) Frequência das espécies em relação a  $E_g$ . (D) Correlação entre  $E_g$  e  $E_{\text{semente}}$ . (E) Frequência de espécies em relação a  $E_{\text{USS}}$ . (F) Correlação entre  $E_{\text{USS}}$  e  $E_{\text{semente}}$ . As mudas indicadas em “E” foram plantadas em um esquema de  $2 \times 2$  m (2.500 mudas/ha, com base em Raupp et al. 2020). Nos painéis A e B,  $n = 146$  espécies com dados de germinabilidade do lote de sementes em três ou mais observações. Nos outros painéis,  $n = 226$  espécies com três ou mais observações..... 42

**Figura 4:** Relação entre métricas de sucesso e classe de tamanho de semente analisada usando modelos lineares generalizados (Família Gamma). (A)  $E_{\text{semente}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). (B)  $E_{\text{semente}}$  e  $E_{\text{germ}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 146$  espécies com dados de germinabilidade do lote de sementes em três ou mais observações). (C)  $E_g$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). (D)  $E_{\text{USS}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). Letras iguais indicam a ausência de diferença estatística usando contrastes a posteriori com um nível de significância de  $p \leq 0,05$ ..... 43

**Figura 5:** Propágulos, sementes e plântulas. (A) Parcela de  $1 \text{ m}^2$  usada para testes de emergência em campo, semeadura de *Hymenaea stigonocarpa*. (B) *Parkia platycephala* em um teste para avaliar os requisitos de quebra de dormência e a profundidade ideal de semeadura. (C) *Bixa orellana* requer quebra de dormência em laboratório, mas emerge sem quebra de dormência após 30-45 dias no viveiro e no campo. (D) Fruto e semente bem aderidos ao fruto em *Dipteryx alata*. (E) Emergência de plântulas de *Dipteryx alata* a partir

do fruto; as sementes semeadas com o fruto se estabelecem duas a três vezes mais frequentemente do que as sementes extraídas do fruto. (F) Sementes de *Guazuma ulmifolia* após a quebra de dormência física por imersão em água a 90°C por um minuto, sem remover a mucilagem antes da semeadura, um tratamento que aumenta o estabelecimento no campo de 8 a 12 vezes. (G) Formigas atacando uma semente não enterrada. (H) Da esquerda para a direita, frutos abaixo e sementes acima de *Acrocomia aculeata*, *Syagrus oleracea* e *Centrolobium tomentosum*; suas sementes representam, respectivamente, apenas 19%, 12% e 3% do peso do diásporo (fruto + semente), que é a unidade de propagação e comercialização; para *C. tomentosum*, o fruto foi cortado, e a semente foi marcada em vermelho porque estava fortemente aderida ao fruto. .... 48

## - Capítulo 2 -

**Figura 1:** Tamanhos de efeito no estabelecimento de plântulas para as dez técnicas de manejo empregadas na semeadura direta e suas interações com características funcionais de sementes e plântulas. As classes de massa de sementes e teor de água foram classificadas após a análise da variável contínua, se significativa. Os tipos morfofuncionais de plântulas são: fanerocotiledonar-epígea-foliácea (FEF), fanerocotiledonar-epígea-reserva (FER), fanerocotiledonar-hipógea-reserva (FHR) e criptocotiledonar-hipógea-reserva (CHR)..... 73

## - Capítulo 3 -

**Figura 1:** Associação entre as 14 características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas pela Análise Fatorial de Dados Mistos (características detalhadas na Tabela 1). (A) Dimensionamento contínuo. (B) Dimensionamento categórico. O dimensionamento contínuo e categórico não foi sobreposto para não afetar a visualização e interpretação, já que ocupam escalas distintas no espaço multidimensional. Características avaliadas em 210 espécies (Tabelas S4, S5, S6). ..... 110

**Figura 2:** Espécies e associações entre as características funcionais. A, *Guazuma ulmifolia*; B, *Ormosia arborea*; C, *Magonia pubescens*; D e E, *Hymenaea stigonocarpa*; F, *Aspidosperma macrocarpon*; G, *Eugenia dysenterica*; H, *Calophyllum brasiliense*; I, *Euterpe edulis*; J, *Genipa americana*; K, *Solanum paniculatum*; L, *Apeiba tibourbou*; M, *Solanum lycocarpum*; N, *Senna alata*. GE, germinabilidade; SG, sementes grandes; SMP, sementes muito pequenas; SU, sementes úmidas e de curta longevidade; SS, sementes secas e de longa longevidade; SR, sementes redondas; SP, sementes planas; ZOO, dispersão zoocórica; AUT, dispersão autocórica; ANE, dispersão anemocórica; ND, não dormente; PY, dormência física; PD, MD e MPD, dormência fisiológica, morfológica e morfofisiológica (endógena); PY+PD, dormência combinada; CP, plântula criptocotiledonar; FA, plântula fanerocotiledonar; HI, plântula hipógea; EP, plântula epígea; CR, cotilédones de reserva; CF, cotilédones fotossintetizantes; CL, crescimento lento e vida longa; CMR, crescimento muito rápido e vida curta; SAT, savana tropical; FTS, floresta tropical seca; FTC, floresta tropical chuvosa. Os painéis de fundo preto foram generosamente cedidos pelo botânico Marcelo Kuhlmann. Os quadrados nos painéis azuis têm 1 x 1 cm. .... 111

**Figura 3:** Efeito de cada característica funcional ou da história de vida das sementes e plântulas. (A) Média da emergência. (B) Média da sobrevivência. (C) Média do estabelecimento. A massa e longevidade das sementes foram categorizadas a posteriori para facilitar a visualização..... 112

**Figura 4:** Efeito de cada característica funcional ou da história de vida das sementes e plântulas. (A) Variação da emergência. (B) Variação da sobrevivência. (C) Variação do estabelecimento. A massa, longevidade e forma das sementes foram categorizadas a posteriori para facilitar a visualização. .... 113

## **Lista de tabelas**

### **- Capítulo 1 -**

**Tabela 1:** Métricas de sucesso da semeadura direta propostas e calculadas neste estudo e seu significado ecológico e econômico..... 37

### **- Capítulo 2 -**

**Tabela 1:** Técnicas de manejo para restauração por semeadura direta, características funcionais ou de história de vida de sementes e plântulas, e hipóteses sobre como elas interagem para afetar a emergência e a sobrevivência das plântulas e, portanto, o sucesso do estabelecimento das plântulas..... 62

**Tabela 2:** Características funcionais ou da história de vida de sementes e plântulas, unidades de medida e descrições das características..... 70

### **- Capítulo 3 -**

**Tabela 1:** As características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas, unidades de medida, descrição, significado funcional e resposta funcional esperada na regeneração natural e semeadura direta. Referências foram citadas na informação de apoio (Tabela S11)..... 90

## Resumo da tese

A semeadura direta é um método custo-efetivo, porém pode resultar em baixo percentual e uma alta variação no estabelecimento entre as espécies e regiões. À medida que a restauração por semeadura direta se torna mais comum, é crucial entender suas limitações para aprimorar sua eficácia. Diante da lacuna de sínteses sobre a semeadura direta de espécies nativas, decidimos conduzir uma revisão sistemática da pesquisa sobre semeadura direta no Brasil, que abrange 26% dos estudos globais. Os objetivos da tese foram: (1) investigar a perda de sementes em cada fase de estabelecimento; (2) avaliar diferentes métricas de sucesso das espécies; (3) compreender como as técnicas de manejo usadas para o processamento de sementes, preparação do local, semeadura e manejo pós-semeadura interagem com as características funcionais das sementes e plântulas; e (4) investigar como as características funcionais afetam o sucesso de estabelecimento. Encontramos 111 estudos e extraímos as proporções de germinabilidade do lote de sementes, emergência, sobrevivência e estabelecimento de plântulas no campo para 333 espécies de árvores, arbustos e palmeiras. No Capítulo 1, descobrimos que 47% das sementes são semeadas em campo sem viabilidade e que a fase de emergência de plântulas foi responsável por 30% da perda de sementes. A relação positiva entre o estabelecimento de plântulas e o tamanho da semente foi neutralizada ao considerar a viabilidade do lote de sementes na equação de sucesso e foi revertida a favor de sementes pequenas quando a massa (sementes  $<10$  mg = 2,55 plantas/g vs sementes  $\geq 1000$  mg = 0,03 plantas/g) e os custos ( $<10$  mg = 6,70 plantas/US\$ vs sementes  $\geq 1000$  mg = 2,18 plantas/US\$) foram considerados no denominador. No Capítulo 2, descobrimos que o enterramento das sementes dobrou o estabelecimento. A fertilização orgânica reduziu o estabelecimento de espécies de savana, enquanto o consórcio com espécies de adubação verde ou culturas agrícolas aumentou o estabelecimento de espécies de floresta. O controle de plantas daninhas favoreceu espécies pioneiras e plântulas com cotilédones fotossintetizantes. O estabelecimento de espécies pioneiras foi de 15% em pleno sol e 3% na sombra, enquanto o estabelecimento de espécies clímax tolerantes à sombra foi de 8% em pleno sol e 28% na sombra. No Capítulo 3, descobrimos que a emergência foi positivamente relacionada com a massa e a longevidade da semente. Cotilédones de reserva promoveram uma emergência 1,5 vezes maior do que cotilédones fotossintetizantes. Espécies de savana e floresta seca tiveram uma sobrevivência 1,5 vezes

maior do que espécies de floresta chuvosa. O estabelecimento foi 2,1 vezes maior em sementes não dormentes e com dormência física do que em sementes com dormência endógena e combinada. O sucesso das espécies pode aumentar até quatro vezes com manejo e cuidado antes e após a semeadura direta. Isso se traduz em uma potencial redução no uso de sementes de 25% a 75%, que é o principal custo da semeadura direta. Recomendamos considerar a viabilidade do lote, a massa das sementes e os custos na equação de sucesso da semeadura direta, ponderando a grande variação interespecífica no investimento reprodutivo das espécies, bem como os custos.

**Palavras-chave:** Árvores tropicais; Estabelecimento de plântulas; Filtros ecológicos; Função dos cotilédones; Longevidade das sementes; Massa das sementes; Forma das sementes; Restauração custo-efetiva; Restauração baseada em sementes; Sementes nativas.



## Thesis abstract

Direct seeding is a cost-efficient method but can result in a low percentage and high variation in establishment between species and regions. As direct seeding restoration becomes more common, we need to understand its limitations to improve its effectiveness. Given the lack of syntheses on direct seeding of native species, we decided to conduct a systematic review of research on direct seeding in Brazil, which covers 26% of global studies. The objectives of the thesis were (1) to investigate seed loss at each establishment phase; (2) to evaluate different metrics of species success; (3) to understand how management techniques used for seed processing, site preparation, seeding, and post-seeding management interact with the functional traits of seeds and seedlings; and (4) to investigate how functional traits affect establishment success. We found 111 studies and extracted germinability proportions from seed lots, emergence, survival, and seedling establishment in the field for 333 species of trees, shrubs, and palms. In Chapter 1, we found that 47% of seeds sown in the field were non-viable and that the seedling emergence phase accounted for 30% of seed loss. The positive relationship between seedling establishment and seed size was neutralized when considering seed lot viability in the success equation and was reversed in favor of small seeds when mass (seeds  $<10$  mg = 2.55 plants/g vs seeds  $\geq 1000$  mg = 0.03 plants/g) and costs ( $<10$  mg = 6.70 plants/US\$ vs seeds  $\geq 1000$  mg = 2.18 plants/US\$) were considered in the denominator. In Chapter 2, we found that seed burial doubled establishment. Organic fertilization reduced the establishment of savanna species, while intercropping with green manure or agricultural crops increased the establishment of forest species. Weed control favored pioneer species and seedlings with photosynthetic cotyledons. Pioneer species establishment was 15% in full sun and 3% in the shade, while shade-tolerant climax species was 8% in full sun and 28% in the shade. In Chapter 3, we found that emergence was positively related to seed mass and seed longevity. Reserve cotyledons promoted 1.5 times higher emergence than photosynthetic cotyledons. Savanna and dry forest species had 1.5 times higher survival than wet forest species. Establishment was 2.1 times higher in non-dormant and physical dormancy seeds than seeds with endogenous and combined dormancy. Species success can increase up to four times with management and care before and after direct seeding. This translates to a potential reduction in seed use from 25% to 75%, the main cost of direct seeding. We recommend considering seed lot

viability, seed mass, and costs in the direct seeding success equation to account for the significant interspecific variation in species reproductive investment and costs.

**Keywords:** Cost-effective restoration; Cotyledon function; Ecological filters; Native seeds; Seed longevity; Seed mass; Seed shape; Seed-based restoration; Seedling establishment; Tropical trees.

## Introdução geral

A restauração ecológica é um processo intencional que visa garantir que um ecossistema degradado alcance um estado de referência pré-determinado ou de maior complexidade estrutural, funcional e de diversidade. (Chazdon, 2008; Holl & Aide, 2011). A restauração ecológica auxilia na contenção das mudanças ambientais e climáticas globais, viabilizando a redução do carbono atmosférico e recuperando serviços ecossistêmicos indispensáveis para a sobrevivência humana, como a regulação hidrológica (Bustamante *et al.*, 2019). Estima-se que há 2 bilhões de hectares de terras degradadas no mundo (Minnemeyer *et al.*, 2011), dos quais a Cúpula do Clima das Nações Unidas de 2014 estabeleceu a meta de restaurar 350 milhões (Latawiec *et al.*, 2015). Em concordância com essa meta e buscando a manutenção da biodiversidade no Brasil, o governo estabeleceu o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Brasil, 2017). Esse plano visa estimular a recuperação de 12,5 milhões de hectares de vegetação nativa, dos quais 38% estão na Floresta Amazônica, 38% na Mata Atlântica, 17% no Cerrado, 4% na Caatinga, 2% no Pampa e 1% no Pantanal.

Para alcançar as metas de restauração, é fundamental utilizar métodos eficientes. Em áreas com alto potencial de regeneração natural, a melhor alternativa é eliminar os distúrbios, conduzir regenerantes e controlar espécies espontâneas prejudiciais ao estabelecimento das espécies nativas. (Chazdon, 2008; Holl & Aide, 2011). Por outro lado, em áreas com baixo potencial de regeneração natural, são necessárias intervenções maiores e mais caras. Destacam-se o plantio de estacas de plantas frutíferas, que rebrotam, crescem rapidamente e atraem a fauna dispersora (Zahawi, 2005), a transferência de *topsoil* com sementes e propágulos vegetativos (Ferreira & Vieira, 2017), a transferência de plantas e propágulos vegetativos (Pilon *et al.*, 2019), o plantio de mudas (Holl & Aide, 2011) e a semeadura direta das espécies nos locais de restauração (Campos-Filho *et al.*, 2013; Pellizzaro *et al.*, 2017). Esses métodos podem ser usados simultaneamente ou em etapas subsequentes do mesmo esforço de restauração, dependendo do contexto e dos objetivos

A semeadura de espécies nativas se destaca entre os métodos de restauração ativa pela sua eficácia e baixo custo de implementação (Masarei *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2019). Ela consiste em introduzir as sementes diretamente no solo do local onde se deseja estabelecer uma comunidade vegetal (Masarei *et al.*, 2019; Pérez *et al.*, 2019). Esse método possibilita que as sementes se estabeleçam em microsítios adequados que foram

previamente preparados, enquanto a grande quantidade de sementes aplicada imita a pressão de propágulos da regeneração natural. (Balandier, Frochot & Sourisseau, 2009; Löff *et al.*, 2019). O desenvolvimento da planta estabelecida por semente é favorecido por não haver o estresse do transplante, como acontece com o plantio de mudas. (Engel & Parrotta, 2001; Fagundes *et al.*, 2018). Podem ser usadas ervas, arbustos, palmeiras e árvores, dependendo da vegetação de referência (e.g., floresta, savana ou campo), favorecendo o rápido fechamento de copas, a cobertura do solo e a substituição de espécies colonizadoras por espécies mais tardias. (Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019).

O espaço entre plantas semeadas é mais natural, propiciando tanto as relações de competição quanto de facilitação (Campos-Filho *et al.*, 2013). O preparo do solo e a semeadura podem ser mecanizados, e a logística para transportar sementes é simples, devido ao pequeno volume que ocupam (Pérez *et al.*, 2019). As desvantagens incluem a morte por dessecação pré e pós-emergência, devido às temperaturas extremas em áreas abertas, a predação de sementes por animais e o abafamento das plântulas por gramíneas exóticas (Camargo, Ferraz & Imakawa, 2002; Löff *et al.*, 2019). Em média, apenas 13% das sementes se convertem em plântulas (Ceccon, González & Martorell, 2016; Silva & Vieira, 2017; Pellizzaro *et al.*, 2017; Souza & Engel, 2018; Passaretti, Pilon & Durigan, 2020). O estabelecimento pode ser ainda menor quando a implantação e manutenção são feitas de forma descuidada. Como as sementes são o maior componente de custo da semeadura direta (Raupp *et al.*, 2020), precisamos aperfeiçoar o método e aumentar a porcentagem de emergência e sobrevivência das plântulas. Também é necessário compreender os gargalos do método para intervir nas fases de recrutamento mais sensíveis e melhorar sua eficiência. Além disso, é fundamental selecionar espécies com maior custo-efetividade (Ferreira *et al.*, 2023). Para isso, é indispensável estudar as características funcionais das sementes e plântulas usadas na semeadura direta.

O sucesso da semeadura direta depende da compreensão dos atributos ecológicos das espécies semeadas, das condições ambientais da área de restauração e do manejo pré e pós-semeadura (Pérez *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2019). Sementes pequenas e achatadas perdem a capacidade de emergir se enterradas a mais de 1 cm, enquanto as grandes e esféricas emergem a partir de 5 cm de profundidade (Daws *et al.*, 2008; Silva & Vieira, 2017). Sementes grandes geram plântulas inicialmente maiores, que resistem melhor às condições estressantes de áreas preparadas para restauração (Camargo *et al.*, 2002; Silva & Vieira, 2017). Cotilédones de reserva parecem maximizar o estabelecimento nos

primeiros anos após a semeadura (Santos & Buckeridge, 2004; Silva & Vieira, 2017) por estimularem a formação aérea e radicular. O teor de água também interfere na emergência; sementes recalcitrantes têm maior mortalidade do que as ortodoxas, pois não toleram a desidratação causada por altas temperaturas em sítios de restauração (Silva & Vieira, 2017; Löf *et al.*, 2019). A dormência espalha os riscos de mortalidade durante o processo germinativo, e superá-la para acelerar e sincronizar a emergência pode aumentar a probabilidade de morte massiva das sementes e plântulas por dessecação, caso ocorra um veranico (Campos-Filho *et al.*, 2013; Masarei *et al.*, 2019; Correia *et al.*, 2022).

O sucesso da semeadura direta também depende da melhoria na implementação e manejo, pois muitas vezes os procedimentos adotados resultam em fracasso e alta variabilidade no sucesso das espécies (Palma & Laurance, 2015; Meli *et al.*, 2018; Souza & Engel, 2018; Freitas *et al.*, 2019; Shaw *et al.*, 2020). Semeaduras realizadas em área total tendem a formar comunidades semelhantes às naturais, estratificadas e com maior diâmetro por planta. Em contraste, semeaduras feitas em linha ou em covas ficam mais abertas, favorecendo a colonização de plantas indesejadas (Campos-Filho *et al.*, 2013). Por outro lado, em covas e linhas é possível ter maior controle na profundidade de enterramento das sementes e controlar competidoras por diversas técnicas (Vieira *et al.*, 2020). Gramíneas exóticas são talvez a maior barreira para a restauração (Sampaio *et al.*, 2019), pois inibem a emergência e competem fortemente por luz e nutrientes (Silva & Vieira, 2017). Controlá-las antes e após a semeadura é essencial (Sampaio *et al.*, 2019). O uso de plantas companheiras comerciais, como plantas agrícolas e de adubação verde, tem se mostrado muito eficaz para o sucesso da semeadura direta (Campos-Filho *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019). Espécies de adubação verde sombreiam as gramíneas invasoras, melhoram o microclima para o estabelecimento das plântulas, são preferencialmente atacadas por formigas, descompactam o solo, adicionam matéria orgânica e fixam nitrogênio (Reis *et al.*, 2019).

O maior projeto de restauração florestal por semeadura direta no Brasil, na Bacia do Rio Xingu, utiliza apenas parte da diversidade de árvores, excluindo espécies que produzem sementes recalcitrantes e cuja dispersão ocorre logo após a semeadura, devido à janela de coleta (Rodrigues *et al.*, 2019). Além disso, das 40 – 80 espécies semeadas, apenas 20 – 40 têm sucesso no estabelecimento (Rodrigues *et al.*, 2019). As espécies bem-sucedidas produzem sementes em grande quantidade, são grandes e ortodoxas (Pérez *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019). Assim, é necessário estudar a ecologia de sementes e plântulas, sua emergência e estabelecimento inicial (Khurana & Singh, 2001;

Ribeiro *et al.*, 2016), para permitir que mais espécies sejam utilizadas na semeadura e que os atributos funcionais sejam o foco na escolha das espécies (Khurana & Singh, 2001; Saatkamp *et al.*, 2019). Além disso, ao conhecer as respostas funcionais ao ambiente, é possível manipular características das sementes (como superação de dormência e peletização), das áreas (ambiente de luz da semeadura) e processos de plantio (como preparo do solo e profundidade da semeadura) para melhorar o estabelecimento de espécies restringidas pelo método.

Nos últimos anos, a semeadura direta se difundiu pelo Brasil, alçada principalmente pela Iniciativa Caminhos da Semente (Caminhos da Semente, 2024). Essa iniciativa tem o objetivo de dar escala à restauração ecológica no Brasil, com foco na semeadura direta. A Iniciativa Caminhos da Semente também promove redes de coletores de sementes e empresas que comercializam sementes e serviços associados à restauração ecológica. Vendo que havia lacunas científicas importantes a serem estudadas e que a prática de restauração com sementes estava ganhando escala, resolvemos desenvolver a presente tese.

Nesta tese, avaliamos (1) quais fases do estabelecimento mais restringem que as sementes se convertam em plântulas no campo, (2) como outras métricas de sucesso se relacionam com a métrica usual (plantas vivas/sementes semeadas), (3) como as técnicas de manejo interagem com as características das sementes e plântulas, afetando o sucesso das espécies, e por fim, (4) quais características funcionais das sementes e plântulas favorecem ou desfavorecem o sucesso das espécies na semeadura direta. Para isso, desenvolvemos três revisões sistemáticas quantitativas da literatura disponível sobre experimentos de semeadura direta realizados no Brasil (111 estudos, com 333 espécies de árvores, arbustos e palmeiras). Consideramos estudos que realizaram a semeadura direta em área total ou para enriquecimento de vegetação secundária. A tese foi dividida em três capítulos de revisão.

## CAPÍTULO 1 - O nexu entre o tamanho da semente, a germinação, a emergência e o estabelecimento das plântulas e novas métricas para o sucesso da restauração por semeadura direta



*Copaifera langsdorffii* Desf. A festa da germinação começa alguns dias após a semeadura e se estende ao longo dos meses de chuva. O pau-d'óleo é um velho conhecido. Quando eu mal sabia caminhar sozinho, a bisa levou-me até seu pau-d'óleo. Ele ficava numa matinha de terra seca, no fundo da casa dela. O pau-d'óleo tinha umas cinco braças de altura, que imponência. Tinha um entalhe feito a machado, há tanto tempo que talvez nem o tempo se lembre quando. Com uma cabacinha, a bisa recolheu o óleo cuidadosamente, engarrafou e tampou o entalhe com uma chapa de lata. Ela passou o dedo besuntado de óleo na minha boca e disse, “remédio forte, cura tosse, corta gripe”. Acho que, na verdade, foi um tipo de batizado na igreja dos macacos, para que o menino virasse um tipo de ‘macegueiro plantador’.

Este capítulo foi submetido na revista *Biological Reviews* e foi considerado para Revisão Maior.

## Resumo

A semeadura direta é um método barato, mas muitas vezes subestimado devido à baixa porcentagem de estabelecimento de plântulas, especialmente para sementes pequenas. Como a restauração por semeadura direta está se tornando mais comum, precisamos entender suas limitações. Compreender as perdas de sementes em cada fase de estabelecimento (i.e., germinabilidade do lote de sementes, emergência e estabelecimento de plântulas) é fundamental para subsidiar o manejo. Além disso, usar o estabelecimento de plântulas ( $E_{\text{semente}}$ : plântulas de 1 ano/sementes semeadas) como a única medida de sucesso não leva em conta a massa da semente, a germinabilidade inicial e o custo de uma plântula estabelecida. Conduzimos uma revisão sistemática da literatura sobre experimentos de semeadura direta no Brasil, onde 26% de todos os estudos de semeadura direta foram realizados globalmente. Investigamos (1) a perda de sementes em cada fase de estabelecimento; (2) como outras métricas de sucesso ( $E_{\text{germ}}$ : plântulas de 1 ano/sementes germináveis semeadas;  $E_g$ : plântulas de 1 ano/massa de sementes semeadas; e  $E_{\text{US\$}}$ : plântulas de 1 ano/custo de aquisição das sementes, semeadura e manutenção) se relacionam com a métrica usual ( $E_{\text{semente}}$ ); e (3) como as métricas variam com o tamanho da semente. Encontramos 111 estudos e extraímos as proporções de germinabilidade do lote de sementes e estabelecimento de plântulas para 333 espécies de árvores e arbustos. As fases de germinabilidade do lote de sementes e emergência de plântulas foram responsáveis por 47% e 30% da perda de sementes, respectivamente. A sobrevivência de plântulas representou apenas 10% da perda de sementes.  $E_{\text{germ}}$ ,  $E_g$  e  $E_{\text{US\$}}$  não se correlacionaram com  $E_{\text{semente}}$ . A relação positiva entre o estabelecimento de plântulas e o tamanho da semente ( $E_{\text{semente}}$ , sementes <10 mg = 1% de estabelecimento vs sementes  $\geq 1000$  mg = 17%) foi neutralizada ao considerar  $E_{\text{germ}}$  e revertida a favor de sementes pequenas considerando  $E_g$  (sementes <10 mg = 2,55 plantas/g vs sementes  $\geq 1000$  mg = 0,03 plantas/g) e  $E_{\text{US\$}}$  (sementes <10 mg = 6,70 plantas/US\$ vs sementes  $\geq 1000$  mg = 2,18 plantas/US\$).  $E_{\text{US\$}}$  (mediana de 4,79 plantas/US\$) foi mais custo-efetiva para a semeadura direta do que para o plantio de mudas para 91% das espécies estudadas. Melhorar a qualidade das sementes e manejar adequadamente a área de restauração para melhorar a fase de emergência pode aumentar substancialmente o  $E_{\text{semente}}$ . As três métricas propostas não foram redundantes com  $E_{\text{semente}}$  e podem ser mais precisas para avaliar o sucesso da semeadura direta.  $E_{\text{semente}}$  falha porque desconsidera que metade das sementes não são viáveis. Além disso, há alta variação interespecífica no investimento



para produzir uma semente, o que pode ser equilibrado aumentando a densidade de semeadura à medida que a germinabilidade e a massa da semente diminuem.  $E_{\text{semente}}$  também não considera o número de plântulas geradas por dólar investido (EUS\$). Sementes pequenas foram mais custo-efetivas quando a massa e o custo da semente, semeadura e manutenção foram considerados no denominador.

**Palavras-chave:** Semeadura direta; Restauração custo-efetiva; Restauração ecológica; Sementes nativas; Restauração baseada em sementes; Estabelecimento de plântulas; Custos da restauração.

## Abstract

Direct seeding is a cost-effective method, but it is often undervalued because it results in low seedling establishment, especially for small seeds. Since direct seeding restoration is becoming more common, we must understand its limitations. Understanding seed losses at each establishment stage (*i.e.* seed lot germinability, seedling emergence, and establishment) is fundamental to support management. Additionally, using seedling establishment ( $E_{\text{seed}}$ : 1-year-old seedlings/seeds sowed) as the sole success metric fails to incorporate seed mass, initial germinability, and the cost of an established seedling. We conducted a systematic literature review on direct seeding experiments in Brazil, which is where 26% of all direct seeding studies have been conducted globally. We investigated (1) seed loss at each establishment stage; (2) how other success metrics ( $E_{\text{germ}}$ : 1-year-old seedlings/germinable seeds sowed;  $E_{\text{g}}$ : 1-year-old seedlings/seed mass sowed; and  $E_{\text{US\$}}$ : 1-year-old seedlings/seed acquisition and planting cost) relate to the usual metric ( $E_{\text{seed}}$ ); and (3) how the metrics vary with seed size. We found 111 studies and extracted the proportions of seed lot germinability and seedling establishment for 333 tree and shrub species. The seed lot germinability and seedling emergence stages were responsible for 47% and 30% of seed loss, respectively. Seedling survival accounted for only 10% of seed loss.  $E_{\text{germ}}$ ,  $E_{\text{g}}$ , and  $E_{\text{US\$}}$  were not correlated with  $E_{\text{seed}}$ . The positive relationship between seedling establishment and seed size ( $E_{\text{seed}}$ , seeds <10 mg = 1% establishment vs seeds  $\geq$ 1000 mg = 17%) was neutralized when considering  $E_{\text{germ}}$  and reversed in favor of small seeds considering  $E_{\text{g}}$  (seeds <10 mg = 2.55 plants/g vs seeds  $\geq$ 1000 mg = 0.03 plants/g) and  $E_{\text{US\$}}$  (seeds <10 mg = 6.70 plants/US\$ vs seeds  $\geq$ 1000 mg = 2.18 plants/US\$).  $E_{\text{US\$}}$  (median of 4.79 plants/US\$) was more cost-effective for direct seeding than for seedling planting for 91% of the studied species. Enhancing seed quality and adequately managing the restoration area for enhancing the emergence stage can substantially increase  $E_{\text{seed}}$ . The three proposed metrics were not redundant with  $E_{\text{seed}}$  and can be more accurate for evaluating direct seeding success.  $E_{\text{seed}}$  fails because it disregards that half the seeds are non-viable. Furthermore, there is high interspecific variation in the species' investment to produce one seed, which can be balanced by increasing seeding density as seed germinability and mass decrease.  $E_{\text{seed}}$  also fails to consider the number of seedlings generated per dollar invested ( $E_{\text{US\$}}$ ). Small seeds were more cost-effective when mass and cost of seed, planting, and maintenance were considered in the denominator.

**Keywords:** Direct sowing; Cost-effective restoration; Ecological restoration; Native seeds; Seed-based restoration; Seedling establishment; Restoration costs.

## I. Introdução

A restauração ecológica no Brasil é uma oportunidade para a mitigação e adaptação às mudanças ambientais e climáticas globais, dado o potencial da vegetação nativa de capturar carbono atmosférico, regular o balanço hídrico e prestar outros serviços ecossistêmicos (Bustamante *et al.*, 2019). Nesse contexto, o governo brasileiro estabeleceu o Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Brasil, 2017). O Plano visa estimular a restauração de 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030, dos quais 38% devem ser implementados na Amazônia, 38% na Mata Atlântica, 17% no Cerrado, 4% na Caatinga, 2% no Pampa e 1% no Pantanal. Para restaurar essa imensa área, serão necessários métodos eficientes. Os métodos mais difundidos incluem a regeneração natural assistida para locais com alto potencial de regeneração (Crouzeilles *et al.*, 2017), bem como o plantio de mudas (Rodrigues *et al.*, 2009) e a semeadura direta (Campos-Filho *et al.*, 2013) para áreas que demandam restauração ativa (Holl & Aide, 2011; Zahawi & Holl, 2014). As estimativas indicam que será necessário produzir de 3,6 a 15,6 mil toneladas de sementes nativas para plantio de mudas e semeadura direta até 2030 (Urzedo *et al.*, 2020).

A semeadura direta destaca-se pelo baixo custo (Raupp *et al.*, 2020), logística simplificada (Shaw *et al.*, 2020), rápida cobertura do solo (Sampaio *et al.*, 2019), rápido fechamento do dossel (Freitas *et al.*, 2019) e pela inclusão de diferentes formas de crescimento e grupos funcionais (Grossnickle & Ivetic 2017). Por outro lado, a semeadura direta resulta em baixo estabelecimento de plântulas (Ceccon *et al.*, 2016), medido pelo número de plântulas estabelecidas com 1 ano de idade dividido pelo número de sementes semeadas (Bonilla-Moheno & Holl, 2010; Silva & Vieira, 2017; Zhang *et al.*, 2021). Para árvores tropicais, os percentuais de estabelecimento de plântulas são de aproximadamente 13% (Silva & Vieira, 2017; Souza & Engel, 2018; Passaretti *et al.*, 2020; Piotrowski *et al.*, 2023). Além disso, sementes muito pequenas geralmente têm porcentagens de estabelecimento inferiores a 1% (Meli *et al.*, 2018; Souza & Engel, 2018; Piotrowski *et al.*, 2023). Por isso, argumenta-se que a semeadura direta é viável apenas para sementes grandes (Souza & Engel, 2018), requer um grande número de sementes viáveis (Souza & Engel, 2023) e desperdiça sementes valiosas para restauração (Piotrowski *et al.*, 2023). Por esse motivo, as espécies foram classificadas como adequadas ou não adequadas para a semeadura direta, usando o sucesso do estabelecimento como único critério (Souza & Engel, 2018, 2023).

Considerando que a sementeira direta tem sido usada com sucesso em escala operacional em várias regiões e ecossistemas brasileiros (Freitas *et al.*, 2019; Sampaio *et al.*, 2019; Caminhos da Semente, 2024; Redário, 2024), e considerando que os estudos sobre tecnologia de sementes para restauração são recentes, é hora de entender as limitações e buscar soluções, em vez de simplesmente descartar espécies, métodos e técnicas. Uma etapa essencial nessa direção é compreender as perdas em cada fase de estabelecimento das plântulas, desde a germinação das sementes até a emergência das plântulas e o estabelecimento em campo. Sabe-se que, da germinação ao estabelecimento, observa-se uma grande mortalidade de indivíduos em populações naturais de plantas, e menos de 1% do total de sementes produzidas pela planta-mãe passa pelos filtros abióticos e bióticos para se estabelecer (Oliveira & Silva, 1993; Asquith, Wright & Clauss, 1997; Holl *et al.*, 2000; Wright *et al.*, 2000; McLaren & McDonald, 2003; Simon & Hay, 2003; Salazar *et al.*, 2012b). O sucesso do estabelecimento pode ser maior com intervenções de restauração que aumentem a proporção de indivíduos bem-sucedidos em cada fase do processo (Doust, Erskine & Lamb, 2006; Woods & Elliott, 2004; Pereira, Laura & Souza, 2013a; Silva & Vieira, 2017).

Além de compreender e manejar as limitações do estabelecimento de espécies por meio da sementeira direta, é importante que as métricas para avaliar o sucesso do estabelecimento considerem a massa de sementes, a germinabilidade e o custo de uma plântula estabelecida. As sementes pequenas apresentam, naturalmente, percentuais de estabelecimento mais baixos do que as sementes grandes, pois há uma compensação significativa entre produzir um grande número de sementes pequenas ou produzir um número menor de sementes grandes com maior investimento e maior chance de estabelecimento (Westoby, Jurado & Leishman, 1992; Westoby *et al.*, 2002; Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008). Essa compensação resulta em uma distribuição mais uniforme da massa total de sementes entre as espécies (Moles & Leishman, 2008). Assim, seria mais adequado avaliar o estabelecimento pela massa de sementes em vez do número de sementes semeadas, pois a massa de sementes representa a estratégia de investimento reprodutivo da planta (Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008).

A germinabilidade das sementes apresenta alta variação intra e interespecífica. A estratégia de regeneração das espécies (Aires, Sato & Miranda, 2014), o ano de produção (Chambers, 1989), as condições abióticas (por exemplo, precipitação, temperatura e

nutrientes do solo) e bióticas (por exemplo, polinização, predação e ataque de patógenos) afetam a formação e a manutenção de sementes bem formadas (Baskin & Baskin, 2014; Barbedo & Santos Júnior, 2018). As condições de coleta (maturidade da semente, teor de água, predação e contaminação pré-dispersão) e as condições de armazenamento (longevidade natural, embalagem, temperatura, umidade, controle de predadores e patógenos) também afetam a germinabilidade (Frischie *et al.*, 2020; Vitis *et al.*, 2020). Portanto, ponderar o estabelecimento pela germinabilidade do lote de sementes semeado significa que apenas as sementes que podem efetivamente germinar são consideradas para calcular o sucesso da semeadura direta (Passaretti *et al.*, 2020).

Por fim, as estimativas do sucesso da semeadura direta podem ser ponderadas pelos custos de produção de sementes e do plantio no campo (Raupp *et al.*, 2020). As sementes mais baratas são (i) pequenas, (ii) produzidas em grande quantidade, (iii) de populações densas, (iv) fáceis de coletar, (v) processar, e (vi) armazenar, contrabalançando suas baixas porcentagens de estabelecimento (Redário, 2024). Em última análise, o custo por plântula influencia muito a decisão do profissional de restauração. O Brasil está na vanguarda da pesquisa em semeadura direta de árvores (26% dos estudos em nível global e 43% dos estudos nos trópicos; Souza, 2022), que tem sido aplicado com sucesso em grandes escalas (Urzedo *et al.*, 2020; Caminhos da Semente, 2024; Redário, 2024). Neste trabalho, realizamos uma revisão sistemática da literatura disponível sobre experimentos de semeadura direta realizados no Brasil (111 experimentos de campo e 333 espécies, principalmente árvores, seguidas de arbustos e palmeiras) para verificar: (1) qual é a porcentagem de perda de sementes da semeadura direta em cada fase de estabelecimento (germinação, emergência de plântulas e estabelecimento); e (2) como as métricas de sucesso propostas neste trabalho ( $E_{\text{germ}}$ : plântulas de 1 ano de idade/sementes germináveis semeadas;  $E_g$ : plântulas de 1 ano de idade/massa de sementes semeadas; e  $E_{\text{US\$}}$ : plântulas de 1 ano de idade/custo de aquisição das sementes, semeadura e manutenção) se relacionam com a métrica de sucesso usual ( $E_{\text{semente}}$ : plântulas de 1 ano/número de sementes semeadas). Também avaliamos (3) como as métricas de sucesso propostas variam de acordo com o tamanho da semente, já que o tamanho da semente está relacionado à germinabilidade, ao estabelecimento e ao custo de produção de sementes.

Testamos três hipóteses neste estudo. Hipótese 1: Esperamos que a germinabilidade inicial das sementes e a emergência no campo sejam as fases mais

restritivas para o estabelecimento no campo. Isso seria explicado pela alta variação na germinabilidade inicial das sementes das espécies nativas (Aires *et al.*, 2014; Chambers, 1989; Baskin & Baskin, 2014) e pela restrição substancial imposta por filtros abióticos e bióticos na fase de emergência (Holl *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2015; Silva & Vieira, 2017). Por outro lado, a sobrevivência é alta depois que a fase de emergência é superada, resultando em uma alta correlação entre a emergência e o estabelecimento (Silva & Vieira, 2017; Ferreira *et al.*, 2023; Piotrowski *et al.*, 2023). Hipótese 2: Não esperamos nenhuma relação entre  $E_{\text{germ}}$ ,  $E_g$ ,  $E_{\text{US\$}}$  e a métrica usual  $E_{\text{semente}}$  porque o efeito do número de sementes semeadas sobre o número de plantas estabelecidas é contrabalançado pela germinabilidade inicial, pela massa semeada e pelo investimento aplicado (Sampaio *et al.*, 2019; Raupp *et al.*, 2020). Hipótese 3: Esperamos que as três métricas de sucesso propostas eliminem o efeito positivo do tamanho da semente que ocorre na  $E_{\text{semente}}$ , porque a massa total de sementes semeadas, a germinabilidade e os custos de produção e plantio de sementes estão relacionados ao tamanho da semente (Westoby *et al.*, 1992, 2002; Moles & Westoby, 2004; Baskin & Baskin, 2014).

## II. Materiais e métodos

### (1) Busca e seleção dos estudos

Usamos os mecanismos de busca dos bancos de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* e a combinação dos termos “direct seeding” ou “direct sowing” e “restoration” e “Brazil” (também em português: “semeadura direta” ou “plantio mecanizado” e “restauração” e “Brasil”), para encontrar estudos sobre semeadura direta de área total ou de enriquecimento realizados no Brasil. Essa busca foi realizada em janeiro de 2022 e incluiu todos os estudos até dezembro de 2021. Incluímos artigos revisados por pares em inglês ou português, capítulos de livros, teses de doutorado, dissertação de mestrado e monografias de graduação. Incluímos a literatura cinza porque ela (i) traz estudos publicados em português que muitas vezes não são submetidos para publicação em revistas científicas e (ii) evita o viés de amostragem apenas para resultados positivos.

Encontramos 87 estudos, sendo que a publicação mais antiga data de 1995. Nas 87 publicações, procuramos outros estudos na seção de referências não encontrados em nossa pesquisa e, assim, encontramos 13 estudos adicionais. Incluímos dois estudos do nosso grupo de pesquisa que ainda não foram publicados. Fizemos exatamente a mesma pesquisa sem restringir o país e encontramos nove estudos realizados na região

neotropical com espécies que também ocorrem no Brasil. Essa pesquisa complementar foi importante para incluir outras espécies e aumentar o número de observações de espécies na Amazônia brasileira. No final, chegamos a um total de 111 estudos (Tabela S1), com 64 artigos revisados por pares, 29 dissertações de mestrado (três destas tinham dois experimentos diferentes, e cada experimento independente foi considerado um estudo), seis monografias de graduação, seis teses de doutorado, um capítulo de livro e dois experimentos com dados não publicados. A descrição dos métodos e os metadados dos experimentos não publicados foram disponibilizados na íntegra (Tabela S2, S3). Quando havia um artigo publicado resultante de uma dissertação ou tese, usamos o artigo e citamos a dissertação ou tese como uma referência adicional (Tabela S1).

Para a análise, incluímos estudos localizados no Brasil (total de 323 espécies) ou com espécies que ocorrem no Brasil e foram semeadas em outros países neotropicais (21 espécies), totalizando 333 espécies, pois 11 se sobrepuseram nas duas listas. Consideramos apenas espécies de árvores, arbustos e palmeiras. As ervas foram desconsideradas porque seu sucesso na semeadura direta é computado como cobertura do solo, o que impede o cálculo da porcentagem de emergência e estabelecimento. Não incluímos árvores e arbustos exóticos ou cultivares agrícolas que geralmente são semeados junto com espécies nativas. Não incluímos espécies que tiveram simultaneamente zero por cento de germinação em laboratório ou viveiro (teste de viabilidade) e zero de emergência e estabelecimento no campo, pois essas sementes não eram viáveis. Consideramos apenas estudos que relataram (por espécie) a emergência de plântulas, o estabelecimento ou ambos. Entramos em contato com os autores de três estudos com informações ausentes ou conflitantes, e eles nos enviaram as informações corretas.

## **(2) Extração e curadoria dos dados**

Extraímos dos estudos os nomes das espécies (atualizados de acordo com a Flora e Funga do Brasil 2023; <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>), a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro (controle de viabilidade), a emergência de plântulas no campo (número total de plantas emergidas/número de sementes semeadas  $\times$  100) e o estabelecimento de plântulas no campo (número de plantas vivas no momento T/número de sementes semeadas  $\times$  100). O estabelecimento foi avaliado aos 3, 6, 12, 18, 24 e 36 meses após a semeadura. Os estudos forneceram a emergência ou o estabelecimento das plântulas ou ambos. A maioria mostrou a emergência e o



estabelecimento aos seis e/ou 12 e/ou 24 meses. Essas informações foram extraídas de textos, tabelas, figuras ou arquivos suplementares. Quando necessário, usamos o Web Plot Digitizer 4.6 (<https://apps.automeris.io/wpd/>) para extrair as informações das figuras com maior precisão. Cada tratamento específico testado para cada espécie em um estudo foi considerado uma observação.

### **(3) Preparação e análise dos dados**

#### *(a) Perda de sementes (ou transições) em cada fase de estabelecimento*

Para avaliar a perda de sementes/plântulas em cada fase de estabelecimento, calculamos a média e os intervalos de confiança de 95% da conversão de sementes em plantas (indivíduos vivos como sementes ou plântulas/sementes semeadas  $\times$  100). As fases de estabelecimento foram (1) germinabilidade do lote de sementes ( $n = 68$  estudos), (2) emergência no campo ( $n = 91$  estudos), (3) estabelecimento em 6 meses ( $n = 49$  estudos), (4) estabelecimento em 12 meses ( $n = 66$  estudos), (5) estabelecimento em 24 meses ( $n = 28$  estudos) e (6) estabelecimento em 36 meses ( $n = 7$  estudos).

#### *(b) Relações entre as fases de estabelecimento*

Para avaliar se os padrões em uma fase poderiam prever o que acontece em outra, usamos modelos lineares de efeitos mistos entre as variáveis (1) germinabilidade do lote de sementes, (2) emergência no campo, (3) estabelecimento em 6 meses, (4) estabelecimento em 12 meses, (5) estabelecimento em 24 meses e (6) estabelecimento em 36 meses, acrescentando o estudo e a identidade da espécie como efeitos aleatórios, utilizando o pacote *lme4*. No total, ajustamos 15 modelos, com a fase anterior prevendo o subsequente, pois não faria sentido ecológico e analítico, por exemplo, que a emergência do campo fosse um indicador da germinabilidade do lote de sementes. Assim, a germinabilidade do lote de sementes foi um indicador para as variáveis 2 a 6, a emergência para as variáveis 3 a 6, o estabelecimento em 6 meses para as variáveis 4 a 6, o estabelecimento em 12 meses para as variáveis 5 e 6 e o estabelecimento em 24 meses para a variável 6. Os modelos apresentaram resíduos normais e homocedásticos. A proporção da variação explicada pelos efeitos fixos do modelo isoladamente ( $r^2$  marginal) foi extraída usando o pacote *performance*.

#### *(c) Métricas de sucesso da semeadura direta*

Padronizamos todas as observações para 12 meses de estabelecimento. O estabelecimento de doze meses foi o período de avaliação mais comum no conjunto de

dados e, a essa altura, as espécies já passaram por uma estação de crescimento e uma estação seca. Sessenta por cento das observações tinham a porcentagem de estabelecimento registrada em 12 meses. Para as observações restantes, usamos a equação descrita na seção anterior para extrapolar ou interpolar os dados para esse período. Extrapolamos os dados de emergência para o estabelecimento de 12 meses usando a equação  $y = 0,6973x$  ( $r^2 = 0,76$ ; LRT = 1645,0;  $p < 0,0001$ ). Extrapolamos os dados de estabelecimento de 6 meses para 12 meses usando a equação  $y = 0,8227x$  ( $r^2 = 0,82$ ; LRT = 1201,6;  $p < 0,0001$ ). Interpolamos o estabelecimento em 12 meses a partir do estabelecimento em 24 meses usando a equação  $y = 0,8714x$  ( $r^2 = 0,94$ ; LRT = 1000,8;  $p < 0,0001$ ). Esse procedimento teve como objetivo corrigir a superestimação do estabelecimento a partir de observações avaliadas antes de 12 meses e a subestimação do estabelecimento quando foi avaliado após 12 meses.

Após a padronização, removemos todas as espécies com menos de três observações, pois três é o número mínimo para calcular a média e o desvio padrão (dois graus de liberdade). Assim, 226 das 333 espécies foram mantidas para calcular as métricas de sucesso (Tabela S4). Em seguida, calculamos a porcentagem média de estabelecimento ( $E_{\text{semente}}$ ) aos 12 meses para cada espécie (Tabela 1).  $E_{\text{semente}}$  é a métrica usual para o sucesso da semeadura direta, que considera o número de plântulas estabelecidas com um ano de idade/número de sementes semeadas.

Calculamos o número de plântulas estabelecidas com um ano de idade/número de sementes germináveis semeadas ( $E_{\text{germ}}$ ) dividindo o estabelecimento pela germinabilidade do lote de sementes  $\times 100$  (Tabela 1). Para essa análise, removemos todas as espécies com menos de três observações e que não tiveram a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro (controle de viabilidade) registrada nos estudos. Assim, 146 espécies de 333 espécies foram mantidas para essa análise (Tabela S5). Em seguida, calculamos o  $E_{\text{germ}}$  para cada observação e calculamos a média para cada espécie. Essa métrica de sucesso pondera o número de plantas geradas pelo número de sementes germináveis.

Calculamos o número de plântulas estabelecidas com um ano de idade/massa de sementes semeadas ( $E_g$ ) como:  $1/\text{massa de sementes necessária para estabelecer uma planta}$ . A massa de sementes necessária para estabelecer uma planta foi calculada dividindo-se a massa unitária da semente (ou propágulo, quando o fruto e a semente são uma unidade inseparável) em gramas pela porcentagem de estabelecimento (Tabela 1).

Essa métrica de sucesso pondera, para cada espécie, o número de plantas geradas por grama de sementes semeadas.

Calculamos o número de plântulas estabelecidas com 1 ano de idade/custo de aquisição das sementes, semeadura e manutenção ( $E_{US\$}$ ) como:  $1/\text{custo de estabelecimento de uma planta}$  (Tabela 1). O custo de estabelecimento de uma planta foi calculado dividindo-se o custo de uma grama de sementes pela métrica  $E_g$ , adicionando uma constante que expressa o custo de semeadura e manutenção. Para calcular essa constante, corrigimos a inflação de todas as atividades necessárias para a semeadura e manutenção até 12 meses (veja detalhes em Raupp et al. 2020). Corrigimos a inflação (em R\$) de 40,68% entre junho de 2019 e setembro de 2023 (1 US\$ = 4,92 R\$ em 4 de setembro de 2023). As atividades consideradas foram controle de formigas (18,26 US\$), transporte de sementes (54,76 US\$), semeadura mecanizada (77,52 US\$), dois controles químicos de plantas daninhas (86,82 US\$), sementes de adubo verde (136,78 US\$) e preparação do solo (278,38 US\$). A soma dessas atividades (US\$ 652,25) dividida por 5.000 plântulas estabelecidas de 1 ano de idade por hectare (uma estimativa conservadora da densidade de plantas obtida com a semeadura direta; veja Raupp et al., 2020) é igual ao custo de semeadura e manutenção (US\$ 0,1305 por plântula). Essa métrica de sucesso pondera o número de plantas geradas por dólar investido na aquisição de sementes, semeadura e manutenção da área no primeiro ano. O custo da grama de sementes (US\$/g) foi calculado considerando os valores médios de 24 redes que comercializam sementes no Brasil, obtidos no Redário. O Redário é um esforço de articulação entre redes de sementes e grupos de coletores de sementes no Brasil (<https://www.redario.org.br/>). Também calculamos  $E_{US\$}$  para o plantio de mudas em um esquema de  $2 \times 2$  m (2.500 mudas/ha, consulte Raupp et al. 2020) para usá-lo como referência.

Ajustamos curvas de distribuição de frequência contínua das espécies (gráfico de densidade) para visualizar graficamente as métricas  $E_{\text{semente}}$ ,  $E_{\text{germ}}$ ,  $E_g$  e  $E_{US\$}$ . Realizamos uma correlação de Pearson entre as métricas de sucesso propostas e a métrica usual ( $E_{\text{semente}}$ ). Para avaliar o peso da germinabilidade do lote inicial de sementes no estabelecimento, testamos a diferença entre  $E_{\text{semente}}$  e  $E_{\text{germ}}$  usando um modelo linear generalizado de efeitos mistos (família Gamma), assumindo a espécie como um efeito aleatório. Adicionamos 1 a  $y$  ( $y+1$ ) para garantir que todas as observações fossem positivas, uma suposição da distribuição Gamma. A variabilidade observada nos dados não foi maior do que a esperada de acordo com a distribuição de probabilidade contínua

Gamma. Inicialmente, testamos a família Gaussiana, mas os resíduos não eram homogêneos e normalmente distribuídos.

*(d) Como as métricas de sucesso são afetadas pelo tamanho da semente?*

Testamos como as métricas de sucesso da semeadura direta ( $y$ ) se relacionam com o tamanho da semente ( $x$ ) usando modelos lineares generalizados (família Gamma). Também adicionamos 1 a  $y$  ( $y+1$ ) para garantir que todas as observações fossem positivas. A variabilidade observada nos dados não foi maior do que a esperada de acordo com a distribuição contínua de probabilidade Gamma. As sementes foram categorizadas em quatro classes de massa: sementes muito pequenas ( $<10$  mg), sementes pequenas ( $\geq 10 < 100$  mg), sementes médias ( $\geq 100 < 1000$  mg) e sementes grandes ( $\geq 1000$  mg) (Palma & Laurance, 2015; Ceccon *et al.*, 2016; Silva & Vieira, 2017; Piotrowski *et al.*, 2023). A massa de sementes da espécie (em miligramas) foi obtida no banco de dados do Laboratório de Ecologia e Conservação da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, DF. Todas as análises foram realizadas em *R* (R Core Team, 2024).

Tabela 1: Métricas de sucesso da semeadura direta propostas e calculadas neste estudo e seu significado ecológico e econômico.

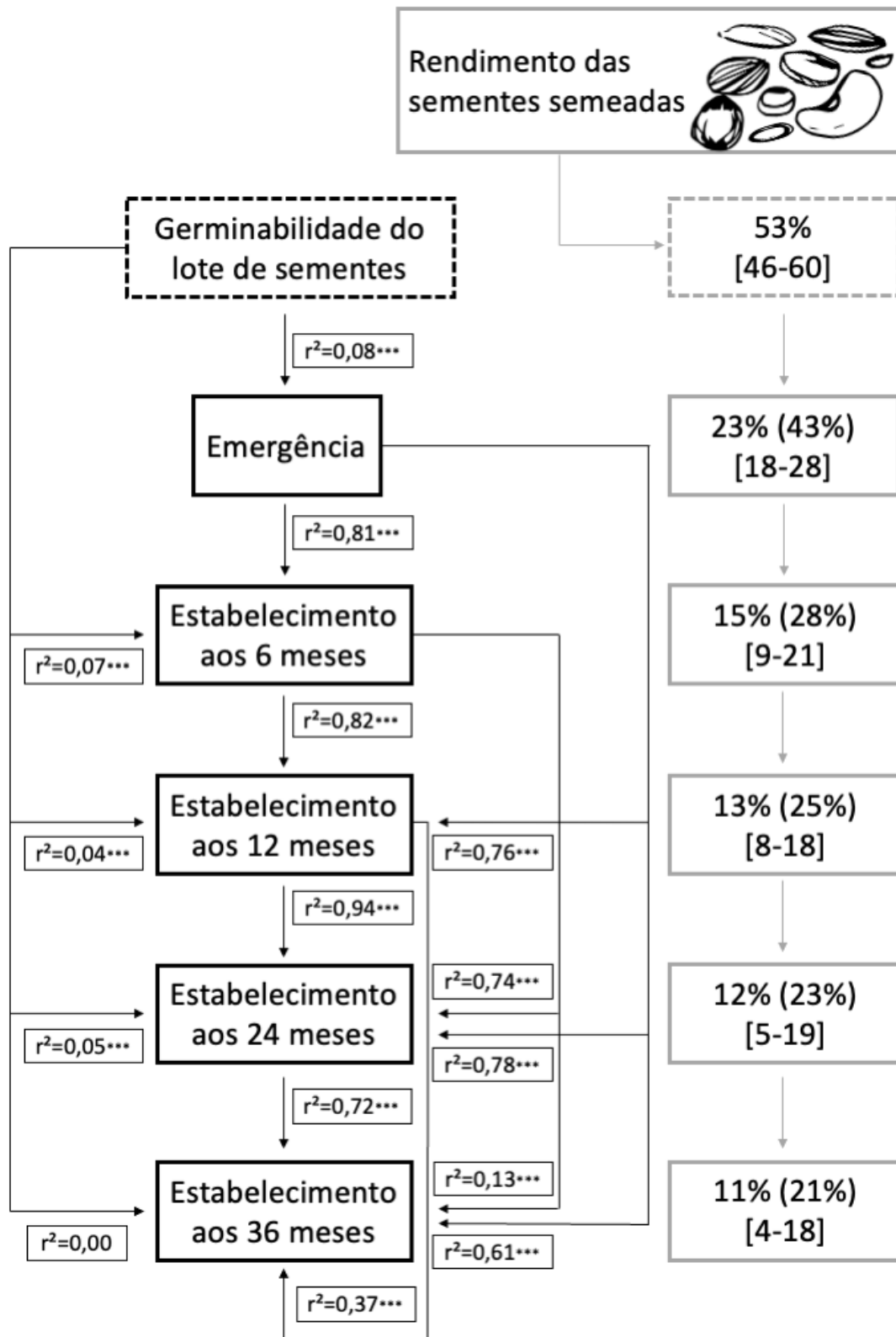
Métrica de sucesso	Nome	Sigla	Equação	Significado
Número de plântulas estabelecidas com 1 ano/número de sementes semeadas	Estabelecimento	$E_{\text{semente}}$	$(\text{Plantas vivas/Sementes}) \times 100$	Rendimento das sementes semeadas
Número de plântulas estabelecidas com 1 ano/número de sementes germináveis semeadas	Estabelecimento ponderado pela germinabilidade total	$E_{\text{germ}}$	$(\text{Estabelecimento/germinabilidade do lote de sementes}) \times 100$	Rendimento de sementes germináveis semeadas
Número de plântulas estabelecidas com um ano de idade/massa de sementes semeadas	Número de plantas/g de sementes	$E_g$	$1/(\text{massa da semente (g)/estabelecimento})$	Rendimento da massa de sementes semeada
Número de plântulas estabelecidas com 1 ano de idade/custo de aquisição das sementes, semeadura e manutenção	Número de plantas/US\$	$E_{\text{US\$}}$	$1/[(\text{US\$/g de sementes/Número de plantas/g de sementes}) + \text{SM}^a]$	Rendimento do investimento econômico
<sup>a</sup> Custo de semeadura e manutenção (SM) por plântula estabelecida = US\$ 0,1305.				

### III. Resultados

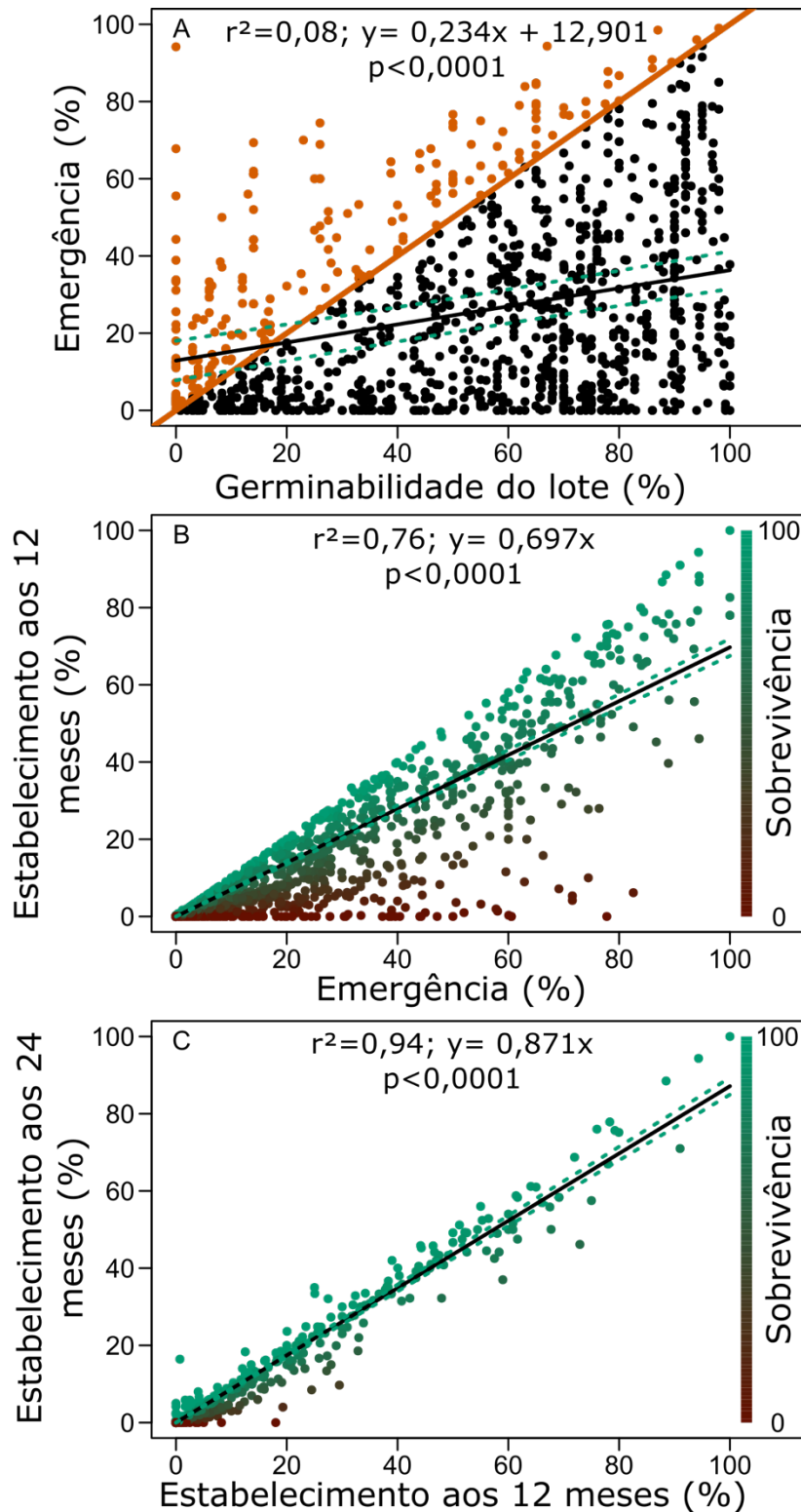
#### (1) Qual é a porcentagem de perda de sementes em cada fase de estabelecimento?

Em geral, apenas 53% das sementes semeadas apresentaram germinabilidade, conforme testes realizados em laboratório ou viveiro. (Fig. 1). A emergência observada em campo foi de 23%, enquanto o estabelecimento das plântulas aos 12 meses foi de 13%. (Fig. 1). A emergência e o estabelecimento das plântulas aos 12 meses, ponderados pela germinabilidade do lote de sementes, foram de 43% e 25%, respectivamente (Fig. 1).

A germinabilidade do lote de sementes em laboratório ou no viveiro foi um preditor fraco da emergência e do estabelecimento em campo para as espécies estudadas (0 a 8% da variação explicada; Fig. 1; Tabela S6). As espécies com germinabilidade <20% tiveram uma emergência em campo  $\geq 20\%$  em 28% das observações. As espécies com germinabilidade >80% tiveram uma emergência em campo  $\leq 80\%$  em 93% das observações (Fig. 2A). Dezenove por cento das observações apresentaram maior emergência em campo do que germinabilidade do lote de sementes em laboratório ou no viveiro (Fig. 2A). A emergência em campo foi um forte indicador do estabelecimento aos 6, 12, 24 e 36 meses (61 a 81%; Fig. 1; Tabela S6). Em média, 70% das plantas emergidas sobreviveram até os 12 meses (Fig. 2B). O estabelecimento aos 6 meses foi um forte preditor para o estabelecimento aos 12 e 24 meses, mas foi um fraco preditor para o estabelecimento aos 36 meses (Fig. 1; Tabela S6). O estabelecimento aos 12 meses foi um forte preditor do estabelecimento aos 24 meses, mas explicou fracamente o estabelecimento aos 36 meses (37%; Fig. 1; Tabela S6). Em média, 87% das plantas estabelecidas aos 12 meses estavam vivas aos 24 meses (Fig. 2C). Algumas plantas ainda emergiram entre o primeiro e o segundo ano, pois 11% das observações tiveram um estabelecimento maior após 24 meses do que após 12 meses (Fig. 2C). O estabelecimento aos 24 meses explicou 72% do estabelecimento aos 36 meses (Fig. 1; Tabela S6).



**Figura 1:** Regressões lineares de efeito misto entre a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro, a emergência no campo e o estabelecimento aos 6, 12, 24 e 36 meses. Caixas tracejadas: germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro. Caixas pretas sólidas: emergência e estabelecimento em campo. Caixas cinza: Sobrevivência geral em uma fase: indivíduos vivos em uma fase/sementes semeadas  $\times$  100; (indivíduos vivos em uma fase/sementes germináveis semeadas  $\times$  100); [I.C. 95% de sobrevivência geral].



**Figura 2:** Regressões lineares de efeitos mistos entre a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro, a emergência no campo e o estabelecimento. (A) Emergência e germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou no viveiro. (B) Estabelecimento aos 12 meses e emergência. (C) Estabelecimento aos 24 meses e estabelecimento aos 12 meses. No painel A, a linha e os pontos em laranja indicam as observações que tiveram maior emergência no campo do que a germinabilidade do lote de sementes. No painel B, a linha vertical (sobrevivência) indica a sobrevivência das plântulas no primeiro ano, calculada como o estabelecimento aos 12 meses dividido pela emergência  $\times 100$ . No painel C, a linha vertical (sobrevivência) indica a sobrevivência da planta no segundo ano, que é o estabelecimento aos 24 meses/estabelecimento aos 12 meses  $\times 100$ .



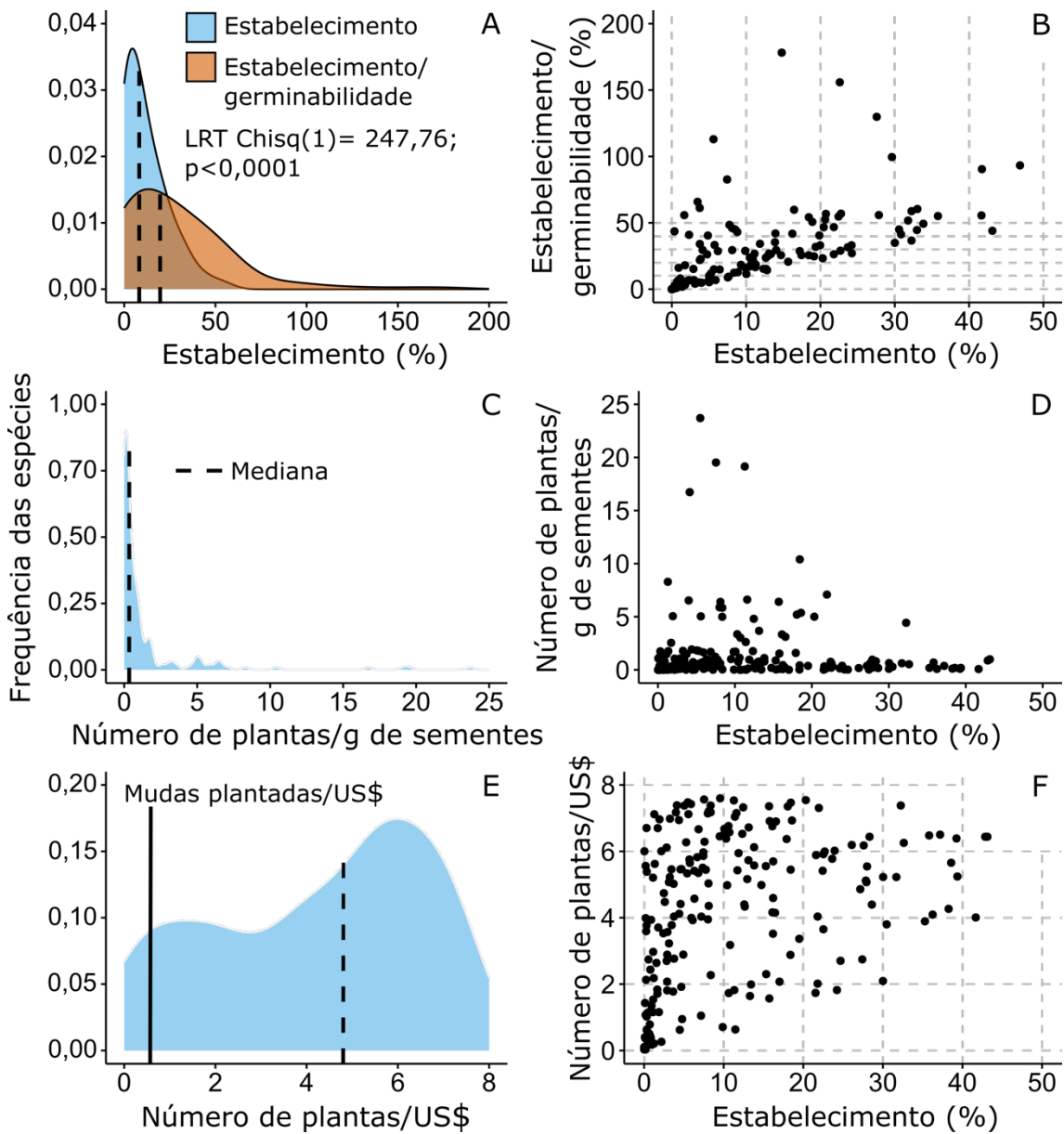
## **(2) Relação entre as métricas de sucesso da sementeira direta**

A germinabilidade do lote de sementes no viveiro ou no laboratório teve uma mediana de 51% (Fig. S1).  $E_{germ}$  foi 2,5 vezes maior do que  $E_{semente}$  (20% vs 8%; Fig. 3A).  $E_{germ}$  foi positivamente correlacionado com  $E_{semente}$  (correlação moderada,  $r=0,44$ ,  $p<0,0001$ ; Fig. 3B). Quarenta e seis por cento das espécies com  $E_{semente} >0-10\%$  atingiram classes mais altas de  $E_{germ}$  (Fig. 3B). Setenta e quatro por cento das espécies produziram  $\leq 1$  planta por grama de sementes semeadas (mediana de 0,34 plantas/g ou 1 planta/2,92 g; Fig. 3C). Não houve correlação entre  $E_g$  e  $E_{semente}$  ( $r= -0,02$ ,  $p=0,7729$ ; Fig. 3D). Um dólar investido na restauração produziu uma mediana 4,79 plantas (Fig. 3E). Mais de 2 plantas/US\$ foram produzidas em 67% das espécies com  $E_{semente}$  acima de 0 e abaixo de 10%, em 87% com  $E_{semente}$  variando de 10 a 20%, em 91% das espécies com  $E_{semente}$  acima de 20 e abaixo de 30%, e em 100% das espécies com  $E_{semente}$  entre 30 e 40% (Fig. 3F). A métrica  $E_{US\$}$  foi correlacionada positivamente com a  $E_{semente}$  (correlação moderada,  $r=0,35$ ,  $p<0,0001$ ; Fig. 3F). Para 91% das espécies, o  $E_{US\$}$  foi maior para a sementeira direta do que para o plantio de mudas em um esquema de 2 x 2 m (Fig. 3E).

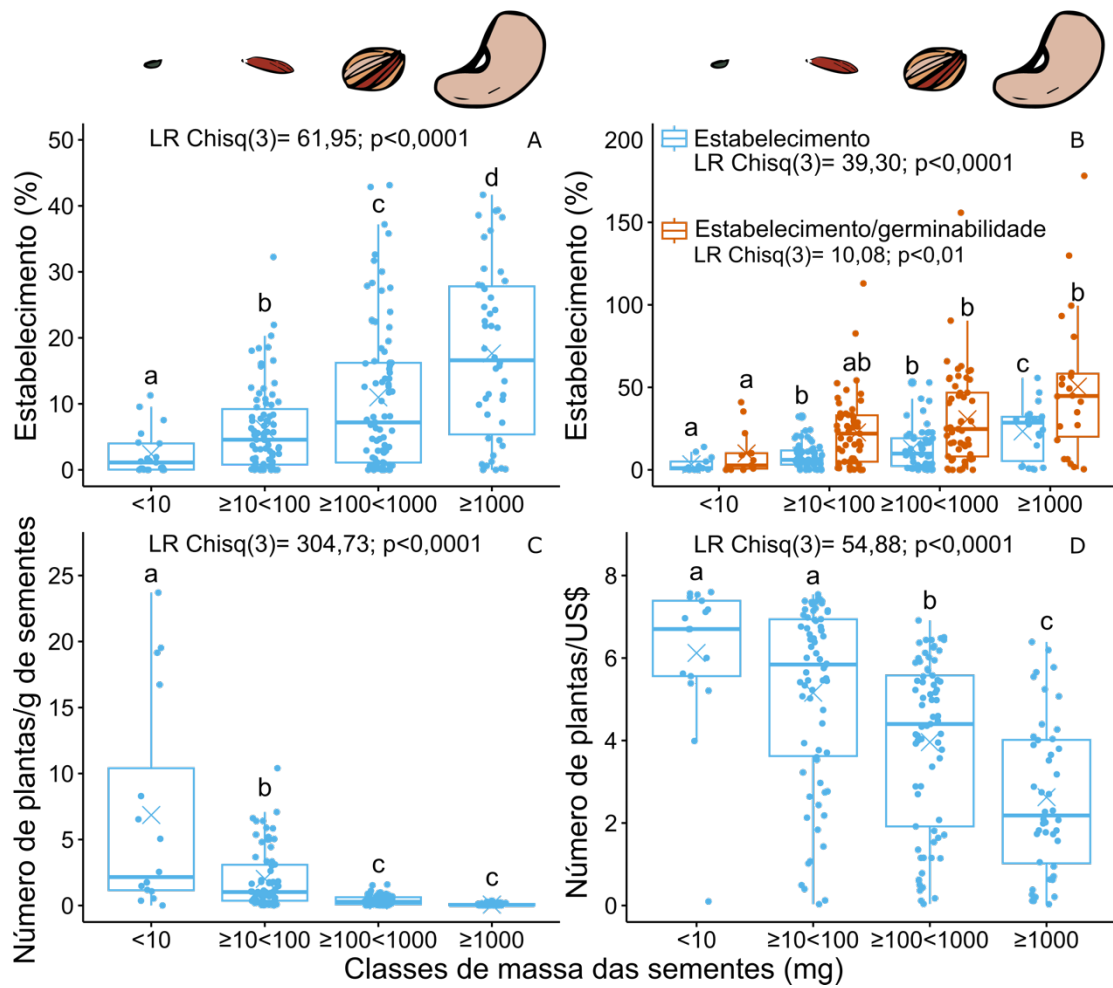
## **(3) Métricas de sucesso e sua relação com o tamanho da semente**

$E_{semente}$  aumentou com o tamanho da semente (Fig. 4A; ver Tabela S4 para cada espécie). As sementes muito pequenas ( $<10$  mg) tiveram  $E_{semente}$  2,6 vezes menor do que as sementes pequenas ( $\geq 10 < 100$  mg). As sementes pequenas tiveram  $E_{semente}$  1,8 vezes menor do que as sementes médias ( $\geq 100 < 1000$  mg). As sementes médias tiveram  $E_{semente}$  1,6 vezes menor do que as sementes grandes ( $\geq 1000$  mg). As diferenças na  $E_{semente}$  entre as classes de tamanhos de sementes diminuíram ao analisar o subconjunto de espécies em estudos que forneceram a germinabilidade do lote de sementes (Fig. 4B; consulte a Tabela S5 para cada espécie). As sementes pequenas e médias não diferiram entre si e tiveram  $E_{semente}$  3,2 vezes maior do que as sementes muito pequenas. As sementes grandes tiveram  $E_{semente}$  entre 1,8 e 6,9 vezes maior do que as outras (Fig. 4B). A  $E_{germ}$  foi menor em sementes muito pequenas (mediana: 3%, média: 10%), mas não diferiu entre sementes pequenas, médias e grandes (mediana: 26%, média: 33%; Fig. 4B). Ao contrário da  $E_{semente}$ , a  $E_g$  e a  $E_{US\$}$  diminuíram com o aumento do tamanho da semente (Fig. 4CD). A  $E_g$  foi 4,9 vezes maior para sementes muito pequenas em comparação com sementes pequenas e 42,5 vezes maior quando comparada com sementes médias e grandes (Fig. 4C). O  $E_g$  foi 8,7 vezes maior para as sementes pequenas do que para as sementes médias e grandes (Fig. 4C). O  $E_{US\$}$  não diferiu entre as sementes muito pequenas e pequenas e

foi 1,4 e 2,1 vezes maior do que o das sementes médias e grandes, respectivamente (Fig. 4D).



**Figura 3:** Frequência de espécies por métricas de sucesso e a relação entre métricas de sucesso e a métrica usual ( $E_{semente}$ ). (A) Frequência de espécies em relação a  $E_{semente}$  e  $E_{germ}$ . As curvas de frequência foram comparadas por um modelo linear generalizado de efeitos mistos (Família Gamma), assumindo cada espécie como um efeito aleatório. (B) Correlação entre  $E_{germ}$  e  $E_{semente}$ . (C) Frequência das espécies em relação a  $E_g$ . (D) Correlação entre  $E_g$  e  $E_{semente}$ . (E) Frequência de espécies em relação a  $E_{US\$}$ . (F) Correlação entre  $E_{US\$}$  e  $E_{semente}$ . As mudas indicadas em “E” foram plantadas em um esquema de  $2 \times 2$  m (2.500 mudas/ha, com base em Raupp et al. 2020). Nos painéis A e B,  $n = 146$  espécies com dados de germinabilidade do lote de sementes em três ou mais observações. Nos outros painéis,  $n = 226$  espécies com três ou mais observações.



**Figura 4:** Relação entre métricas de sucesso e classe de tamanho de semente analisada usando modelos lineares generalizados (Família Gamma). (A)  $E_{\text{semente}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). (B)  $E_{\text{semente}}$  e  $E_{\text{germ}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 146$  espécies com dados de germinabilidade do lote de sementes em três ou mais observações). (C)  $E_g$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). (D)  $E_{\text{USS}}$  em função da classe de tamanho ( $n = 226$  espécies com três ou mais observações). Letras iguais indicam a ausência de diferença estatística usando contrastes a posteriori com um nível de significância de  $p \leq 0,05$

#### **IV. Discussão**

Esta é a mais extensa revisão sistemática da semeadura direta realizada no Brasil e no mundo, na qual analisamos o estabelecimento de 333 espécies em 111 experimentos de campo. Estimamos a perda em cada fase de estabelecimento das plântulas. Descobrimos que a germinabilidade do lote de sementes e a emergência das plântulas no campo são as fases mais restritivas para o sucesso da semeadura direta. Também descobrimos que, após superar a fase de emergência, a sobrevivência é alta. Esses padrões eram desconhecidos para a semeadura direta e são escassos para as comunidades naturais. A compreensão das fases mais restritivas e de alta mortalidade permite que os profissionais de restauração apliquem técnicas de manejo que reduzam as perdas ao longo da trajetória de vida de uma planta, desde a semente até a muda estabelecida.

Propusemos três novas métricas para avaliar o sucesso da semeadura direta como alternativas complementares à métrica usual, que considera o número de plântulas estabelecidas com um ano de idade dividido pelo número de sementes semeadas ( $E_{\text{semente}}$ ). A métrica que pondera a germinabilidade do lote de sementes ( $E_{\text{germ}}$ ) foi mais precisa, pois muitas espécies e lotes usados na semeadura direta têm baixa germinabilidade de sementes, o que deve ser levado em conta na determinação do sucesso da semeadura direta. A métrica que considera a massa de sementes ( $E_g$ ) reflete o investimento em sementes da espécie. A métrica que considera o custo de uma plântula estabelecida, ou o número de plântulas estabelecidas com um ano de idade por dólar investido ( $E_{\text{US\$}}$ ), mostrou a relação custo-efetividade da semeadura direta para cada espécie, que pode ser comparada a outros métodos disponíveis, como o plantio de mudas. As sementes pequenas têm sido não recomendadas para a semeadura direta apenas porque a métrica usual de sucesso de estabelecimento ( $E_{\text{semente}}$ ) considera o número de sementes no denominador. Nosso estudo demonstrou que as sementes pequenas foram mais custo-efetivas quando a massa e o custo da semente, da semeadura e da manutenção foram considerados no denominador.

##### **(1) A perda de sementes não pode ser considerada alta na semeadura direta**

Revisões da literatura concluíram que a semeadura direta falha devido à baixa porcentagem de estabelecimento de plântulas para a maioria das espécies testadas, levando ao desperdício de sementes e à falta de sementes para restauração (Ceccon *et al.*, 2016; Souza & Engel, 2023). Aqui, comparamos as porcentagens de estabelecimento em

semeadura direta e comunidades naturais. Em comunidades naturais, parte das sementes é predada antes e depois da dispersão, e há uma porcentagem de sementes malformadas ou vazias, reduzindo significativamente o número de sementes disponíveis para germinar (Asquith *et al.*, 1997; Vieira & Scariot, 2006a; Salazar *et al.*, 2012a). Para se estabelecerem, as sementes viáveis no solo precisam de condições específicas de umidade, luz e temperatura para emergir e resistir a extremos climáticos, à concorrência com outras plantas e à herbivoria (Holl *et al.*, 2000). Como consequência, apesar da alta variabilidade interespecífica, menos de 1% das sementes produzidas estabelecem plântulas em ecossistemas naturais e degradados (Oliveira & Silva, 1993; Asquith *et al.*, 1997; Holl *et al.*, 2000; Wright *et al.*, 2000; McLaren & McDonald, 2003; Simon & Hay, 2003). Nessa síntese sobre a semeadura direta, a média geral de sementes que se tornaram plântulas após 12 meses foi 13 vezes maior do que em áreas naturais (13%, variando de 0 a 76%) devido às técnicas de manejo implementadas em várias fases, desde a coleta de sementes até a manutenção da área de restauração. Portanto, a semeadura direta aumenta a probabilidade de uma semente se estabelecer como planta, em comparação com o que aconteceria com a semente em áreas naturais de referência.

O sucesso do estabelecimento de plântulas na semeadura direta ainda pode triplicar quando as práticas de manejo ideais são aplicadas à coleta de sementes (maturação fisiológica), armazenamento (época e condições adequadas), semeadura (clima ideal), preparação do solo (solo fofo e descompactado), profundidade de semeadura precisa, superação da dormência quando necessário, controle de plantas daninhas e consórcio com plantas facilitadoras (Pereira *et al.*, 2013a; Silva & Vieira, 2017; Shaw *et al.*, 2020; Correia *et al.*, 2022). São necessárias análises de custo-benefício para recomendar as técnicas de manejo disponíveis (Correia *et al.*, 2022). De qualquer forma, vários estudos foram publicados sobre a tecnologia de sementes e semeadura direta, o que certamente pode aumentar sua eficiência em um futuro próximo.

## **(2) A germinabilidade inicial da semente tem o impacto mais significativo no estabelecimento**

A germinabilidade do lote de sementes antes da semeadura direta teve o impacto mais significativo no estabelecimento. Em média, 47% (2 a 99%) das sementes semeadas no campo eram inviáveis. Esperávamos que a germinabilidade inicial fosse uma das etapas mais restritivas para o estabelecimento (Chambers, 1989; Baskin & Baskin, 2014; Vitis *et al.*, 2020), mas não esperávamos que ela fosse responsável por metade da perda

de sementes. Portanto, para avaliar o sucesso e aplicar a densidade correta de sementes, é essencial considerar a germinabilidade inicial do lote de sementes (Passaretti *et al.*, 2020) ou, pelo menos, a média estimada na literatura para cada espécie. Isso evita que uma espécie que naturalmente tem baixa germinabilidade (i) seja classificada como inadequada para semeadura ou (ii) seja semeada em uma densidade tão baixa que não se estabeleça no campo. Por exemplo, *Machaerium opacum* teve uma porcentagem média de germinação de 7% e foi estabelecida a uma porcentagem que <1% no campo (Tabela S5). Quando avaliamos seu estabelecimento pela germinabilidade inicial do lote de sementes, o sucesso do estabelecimento foi de 16%, revelando a importância da métrica  $E_{germ}$ . Um problema sério observado foi que 58% dos estudos não forneceram ou não verificaram a germinabilidade do lote de sementes para algumas ou todas as espécies semeadas no campo. Além disso, a maioria dos estudos não forneceu informações sobre a data de coleta, a idade do lote de sementes ou as condições de armazenamento. A falta de conhecimento sobre a germinabilidade do lote de sementes afeta o resultado das restaurações e a análise do sucesso da semeadura direta.

Para melhorar a qualidade das sementes aplicadas na semeadura direta, é necessário coletar as sementes (i) após a maturação fisiológica, (ii) aplicando métodos de processamento que conservem a viabilidade das sementes, (iii) evitando a remoção de estruturas acessórias bem aderidas que protegem as sementes, (iv) armazenando-as em embalagens herméticas e sob temperatura e umidade controladas (sala climatizada com desumidificador) quando necessário, (v) excluindo predadores e patógenos e (vi) considerando a longevidade natural das sementes da espécie (Lima *et al.*, 2008; Frischie *et al.*, 2020; Pedrini *et al.*, 2020b; Vitis *et al.*, 2020). Historicamente, a qualidade das sementes não tem sido considerada porque há uma rigorosa seleção e substituição de sementes não germinadas para germinação em laboratório ou viveiro. Em média, apenas 60% das sementes germinam no viveiro para a produção de mudas (Oliveira *et al.*, 2016; Consolaro *et al.*, 2019). Cerca de 10% das mudas não sobrevivem depois da repicagem e transplante para o tubete, e outra parte morre durante o crescimento e rustificação (Oliveira *et al.*, 2016; Consolaro *et al.*, 2019). Mesmo para a produção de mudas, uma semente não corresponde a uma muda estabelecida no campo. Portanto, a qualidade das sementes é um fator limitante para a restauração baseada em sementes e mudas.

### **(3) A germinabilidade do lote de sementes não prevê o estabelecimento no campo**

Normalmente, não há relação entre a germinabilidade do lote de sementes e a emergência das plântulas no campo porque as condições controladas no laboratório ou no viveiro proporcionam umidade constante e baixa variação de temperatura (Grossnickle & Ivetić, 2017; Correia *et al.*, 2022). Em condições controladas, a germinação geralmente ocorre em porcentagens mais altas do que no campo, o que foi confirmado em nosso estudo em 81% das observações. No campo, as sementes estão sujeitas à dessecação causada por flutuações de temperatura e umidade ou durante veranicos (Vieira *et al.*, 2008; Correia *et al.*, 2022). A mortalidade das sementes é causada porque elas se tornam sensíveis à dessecação durante a terceira fase (crescimento embrionário) de absorção de água (Barbedo & Santos Júnior, 2018; Pedrini *et al.*, 2020a). Além disso, a predação de sementes reduz a emergência de plântulas (Holl, 1999; Vieira & Scariot, 2006a). Mesmo assim, 19% das espécies emergiram com maior percentual no campo do que em condições controladas. Isso provavelmente ocorreu porque as condições controladas não forneceram os requisitos para que essas espécies atingissem seu máximo vigor de germinação. Algumas espécies germinam em regimes específicos de luz e temperaturas alternadas (Válio & Scarpa, 2001a). Além disso, a luz, a temperatura e a água constantes no laboratório podem favorecer o ataque de patógenos, reduzindo a germinação de muitas espécies (Baskin & Baskin, 2014; Barbedo & Santos Júnior, 2018). Tudo isso indica a necessidade de mais testes de emergência de plântulas em campo para avaliar a viabilidade ecológica das espécies para a semeadura direta (Fig. 5). Acreditamos que uma agenda de pesquisa que combine a germinação em laboratório e viveiro e a emergência e estabelecimento em campo (Correia *et al.*, 2022; Laumann *et al.*, 2023) é a melhor abordagem para avaliar a viabilidade ecológica de uma espécie para a semeadura direta.



**Figura 5:** Propágulos, sementes e plântulas. (A) Parcela de 1 m<sup>2</sup> usada para testes de emergência em campo, semeadura de *Hymenaea stigonocarpa*. (B) *Parkia platycephala* em um teste para avaliar os requisitos de quebra de dormência e a profundidade ideal de semeadura. (C) *Bixa orellana* requer quebra de dormência em laboratório, mas emerge sem quebra de dormência após 30-45 dias no viveiro e no campo. (D) Fruto e semente bem aderidos ao fruto em *Dipteryx alata*. (E) Emergência de plântulas de *Dipteryx alata* a partir do fruto; as sementes semeadas com o fruto se estabelecem duas a três vezes mais frequentemente do que



as sementes extraídas do fruto. (F) Sementes de *Guazuma ulmifolia* após a quebra de dormência física por imersão em água a 90°C por um minuto, sem remover a mucilagem antes da semeadura, um tratamento que aumenta o estabelecimento no campo de 8 a 12 vezes. (G) Formigas atacando uma semente não enterrada. (H) Da esquerda para a direita, frutos abaixo e sementes acima de *Acrocomia aculeata*, *Syagrus oleracea* e *Centrolobium tomentosum*; suas sementes representam, respectivamente, apenas 19%, 12% e 3% do peso do diásporo (fruto + semente), que é a unidade de propagação e comercialização; para *C. tomentosum*, o fruto foi cortado, e a semente foi marcada em vermelho porque estava fortemente aderida ao fruto.

#### **(4) A emergência no campo causa o segundo impacto mais significativo no estabelecimento**

A emergência em campo teve o segundo impacto mais significativo no estabelecimento. Quarenta e três por cento das sementes viáveis emergiram como plântulas no campo. Para aumentar a porcentagem de emergência, é necessário investigar as causas do fracasso e corrigi-las nas primeiras semanas após a semeadura (Shaw *et al.*, 2020). Além disso, os problemas que não podem ser corrigidos devem ser internalizados para serem aprendidos e manejados no futuro. As principais causas de falha na emergência são (i) controle deficiente de plantas daninhas, (ii) solo mal preparado, (iii) baixa densidade de sementes semeadas, (iv) semeadura em condições ambientais desfavoráveis (por exemplo, chuva imprevisível e veranicos), (v) semeadura superficial para espécies que preferem enterramento (por exemplo, sementes médias e grandes), (vi) enterramento profundo para espécies que preferem a superfície (por exemplo, sementes pequenas e planas), (vii) aplicação de tratamentos pré-germinativos (por exemplo, remoção de sementes muito aderidas ao fruto, quebra de dormência e pré-embebição, Fig. 5 DE) quando são prejudiciais, (viii) não aplicação de tratamentos pré-germinativos quando são necessários (Fig. 5 F), (ix) semeadura a pleno sol quando é melhor na sombra (por exemplo, sementes recalcitrantes e espécies clímax tolerantes à sombra) e (x) predação por formigas e outros animais (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006; Vieira & Scariot, 2006a; Silva & Vieira, 2017; Correia *et al.*, 2022; Shaw *et al.*, 2020). Portanto, para a semeadura direta ser mais eficiente, a emergência das plântulas, que ocorre predominantemente nos primeiros dias e meses após a semeadura, é a fase prioritária para o monitoramento e manejo.

#### **(5) Formação do banco de sementes**

Onze por cento das sementes emergiram entre 12 e 24 meses após a semeadura, mostrando que algumas espécies formam um banco de sementes. Nos estudos analisados, as espécies com sementes dormentes, como *Alibertia edulis* (dormência fisiológica), *Annona coriacea* (dormência morfofisiológica), *Caryocar brasiliense* e *Spondias mombin* (combinação de dormência física + fisiológica), continuaram a emergir até 18

meses após a semeadura. Espécies com forte dormência, como a *Acrocomia aculeata* (combinação de dormência física + fisiológica), *Dimorphandra mollis*, *Enterolobium timbouva* e *Tachigali vulgaris* (dormência física), continuaram a emergir por mais de 24 meses. Espalhar a emergência por mais de duas estações de crescimento é uma estratégia de cobertura de apostas bem documentada, ajudando as sementes a diluir os riscos de mortalidade ao longo do tempo (Garwood, 1983; Simons & Johnston, 2006; Borghetti *et al.*, 2019). O espalhamento da emergência tem sido negligenciada pelas avaliações de curto prazo, embora os resultados da restauração só sejam alcançados em longo prazo (Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019; Aragão *et al.*, 2023). Estudos futuros poderiam investigar o papel do banco de sementes estabelecido pela semeadura direta na dinâmica de recrutamento da comunidade.

#### **(6) A sobrevivência é relativamente alta na semeadura direta**

Após superar a fase de emergência, a porcentagem de sobrevivência foi relativamente alta (70% aos 12 meses), responsável por apenas 10% da mortalidade total das plantas ao longo da trajetória de um ano da semente à plântula. A sobrevivência das plântulas foi semelhante à do plantio de mudas com alto sucesso (>60%, Navarro-Cerrillo *et al.*, 2011; Scaloppi & Souza, 2020; Ferreira *et al.*, 2023) e maior do que no plantio de mudas com baixo sucesso (<35%, McLaren & McDonald, 2003; Fagundes *et al.*, 2018; Mangueira, Holl & Rodrigues, 2019). As plântulas originadas da semeadura direta tiveram porcentagens de sobrevivência mais altas do que nas áreas de regeneração natural (<19%, Oliveira & Silva, 1993; Asquith *et al.*, 1997; Wright *et al.*, 2000; Holl, 2002; Simon & Hay, 2003; Salazar *et al.*, 2012b). Algumas técnicas de manejo usadas na semeadura direta podem aumentar a sobrevivência, com ênfase no (i) controle intensivo de plantas concorrentes, o que alivia a competição por luz, água e nutrientes; (ii) preparação do solo (solo fofo, sem torrões e profundamente descompactados), permitindo que as raízes alcancem camadas profundas e úmidas do solo; (iii) consórcio com espécies de cobertura de crescimento rápido, que descompactam o solo, fixam nutrientes e atenuam os extremos de temperatura e umidade; e (iv) aplicação de cobertura morta, para manter a umidade do solo, reduzir a erosão do solo e evitar a germinação de plantas daninhas (Pereira *et al.*, 2013a; Silva *et al.*, 2015; Silva & Vieira, 2017; Passaretti *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2023; Piotrowski *et al.*, 2023).

### **(7) Houve uma relação fraca de $E_{germ}$ , $E_g$ e $E_{US\$}$ com $E_{semente}$**

As métricas de sucesso da semeadura direta propostas neste estudo não foram correlacionadas com a  $E_{semente}$  (maior  $r=0.44$ ), indicando que elas não são redundantes. Assim, essas métricas podem ser dimensões alternativas e complementares para avaliar o sucesso das espécies na semeadura direta. A métrica de estabelecimento usual ( $E_{semente}$ ) desconsidera que metade das sementes não é viável, que há uma variação interespecífica de até 82 mil vezes no investimento de uma planta para produzir uma semente (massa da semente mais pesada/massa da semente mais leve no estudo, Tabela S4) e desconsidera a variação interespecífica de até 94 vezes no custo de produção de uma semente (semente mais cara/semente mais barata no estudo, Tabela S4).

$E_{germ}$  aumentou a estimativa de sucesso em 12%. Outros autores sugeriram a incorporação de diferenças iniciais de germinabilidade nos cálculos de sucesso (Meli *et al.*, 2018; Passaretti *et al.*, 2020), e nossos resultados reforçaram essa necessidade. Essa métrica é relevante para que os profissionais de restauração aumentem a densidade de semeadura à medida que a germinação das sementes diminui (Aires *et al.*, 2014; Pellizzaro *et al.*, 2017; Meli *et al.*, 2018; Shaw *et al.*, 2020). Sabemos da dificuldade de se obter a germinabilidade do lote de sementes antes da semeadura no campo, pois ambas costumam ser feitas simultaneamente. Entretanto, ter uma média global de muitos lotes ou da literatura para cada espécie não é complicado (Miranda *et al.*, 2020; WebAmbiente, 2024).

As métricas  $E_g$  e  $E_{US\$}$  incorporam, respectivamente, a perspectiva econômica da planta e monetária. A estimativa de sucesso a partir de uma determinada massa semeada ( $E_g$ ) busca reduzir as diferenças de estabelecimento devido a variações no tamanho individual das sementes e padronizá-las em termos de massa de sementes produzida pelas plantas. Essa métrica é especialmente relevante para que os profissionais aumentem a densidade de semeadura à medida que a massa unitária da semente diminui (Aires *et al.*, 2014; Pellizzaro *et al.*, 2017; Meli *et al.*, 2018; Sampaio *et al.*, 2019; Shaw *et al.*, 2020).

Talvez a métrica mais prática para estimar o sucesso das espécies na semeadura direta seja o  $E_{US\$}$ , calculado pela relação custo-efetividade, ou o número de plantas vivas para um dólar investido. Havia espécies com porcentagens de estabelecimento de plântulas abaixo de 10% e um custo por plântula estabelecida menor do que o das espécies com porcentagens de estabelecimento acima de 30%. A dimensão monetária ( $E_{US\$}$ ) é indispensável na escolha de um método de restauração ou reintrodução de espécies. A

semeadura direta teve uma mediana de  $E_{US\$}$  de 4,79 plantas/US\$ e, para 91% das espécies analisadas, foi mais custo-efetiva do que o plantio de mudas.

### **(8) Relação das métricas de sucesso propostas com o tamanho da semente**

Esperávamos que a relação positiva entre a  $E_{\text{semente}}$  e tamanho da semente fosse neutralizada nas três métricas de sucesso propostas (Westoby *et al.*, 1992, 2002; Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008; Baskin & Baskin, 2014). Teoricamente, isso ocorre porque a germinabilidade inicial está positivamente correlacionada - e a produção e o preço da semente estão negativamente correlacionados - com o tamanho da semente (Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008; Baskin & Baskin, 2014; Redário, 2024). Assim, se o sucesso for ponderado pela germinabilidade, massa da semente e investimento monetário, o efeito positivo da massa da semente seria neutralizado. A neutralização não foi confirmada somente para as sementes muito pequenas (<10 mg) na métrica  $E_{\text{germ}}$ . Superando as expectativas, as métricas de estabelecimento  $E_g$  e  $E_{US\$}$  tiveram uma relação negativa com a massa da semente. A inversão em favor das sementes pequenas ocorreu porque a  $E_g$  (i) incorporou a compensação entre produzir uma quantidade maior de sementes pequenas com baixa porcentagem de sucesso de estabelecimento ou produzir algumas sementes grandes com alto sucesso de estabelecimento (Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008); e (ii) as práticas de manejo envolvidas na semeadura direta provavelmente melhoram o estabelecimento de plântulas para sementes muito pequenas desproporcionalmente mais do que para sementes maiores. Em contrapartida, as sementes maiores têm maior estabelecimento de plântulas mesmo em áreas com pouco ou nenhum manejo, como em comunidades de alta integridade. Assim, as sementes pequenas têm mais oportunidades de aumentar o sucesso, pois são muito suscetíveis às condições ambientais e ao nível de manejo (Doust *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2013a).

As diferenças entre as classes de massa foram menores em  $E_{US\$}$  quando comparadas com a grande distância observada em  $E_g$  (Fig. 4 C, D), mas a inversão em favor das sementes pequenas permaneceu. O quilograma de sementes grandes é mais barato do que o de sementes pequenas, mas o preço de mercado das sementes pequenas não inviabiliza seu uso na semeadura direta (Raupp *et al.*, 2020; Redário, 2024). Atualmente, o mercado de sementes nativas oferece muitas opções de espécies de sementes pequenas, pois elas podem produzir muitas sementes por árvore, têm populações densas e são fáceis de coletar, processar e armazenar (Urzedo *et al.*, 2020;

Redário, 2024). Assim, as sementes pequenas foram subvalorizadas na semeadura direta simplesmente porque a métrica tradicional de sucesso ( $E_{\text{semente}}$ ) é baseada na unidade de sementes (por exemplo, as sementes de *Guazuma ulmifolia* pesam 6 mg e as sementes de *Swartzia multijuga* pesam 10.415 mg; Tebala S4). Por outro lado, a massa unitária da semente não deve ser tomada literalmente, mas devemos considerar o que é investido nas reservas da semente e no embrião, pois a contribuição das estruturas acessórias (por exemplo, asas e revestimento espesso) na massa total da semente ou propágulo aumenta com o tamanho da semente (Fig. 5H).

### **(9) Limitações deste estudo e dos estudos analisados**

Embora tenhamos incluído 111 experimentos de campo e analisado 333 espécies, alguns fatores não puderam ser controlados neste estudo. Os estudos originais foram realizados em diferentes climas, regimes de manejo e escalas espaciais e temporais. Corrigimos parte do ruído usando controles estatísticos robustos, acrescentando a identidade do estudo e da espécie como efeitos aleatórios e padronizando o estabelecimento das plântulas para 12 meses. Idealmente, os experimentos de campo em escala operacional (hectares em vez de  $m^2$ ) devem ser replicados em várias regiões, usando os mesmos lotes de sementes ou espécies e registrando a densidade de semeadura, a germinabilidade inicial e o custo de todas as operações. Esses experimentos também devem ser replicados em anos consecutivos para incorporar variações climáticas. Isso permitiria uma avaliação mais robusta do sucesso das espécies por diferentes dimensões e apoiaria as tecnologias de restauração. A falta de informações sobre a data de coleta, a idade do lote de sementes, o método de armazenamento, a massa das sementes e a germinabilidade antes da semeadura foi um problema significativo. Por exemplo, tivemos que reduzir nosso conjunto de dados de 226 para 146 espécies para avaliar o efeito da germinabilidade do lote de sementes.

### **(10) Limitações da semeadura direta para a restauração da biodiversidade**

Oitenta e quatro por cento das 226 espécies analisadas são ortodoxas, o que pode ser explicado pela longevidade das sementes, o armazenamento facilitado e a dispersão concentrada antes da época de semeadura (Rodrigues *et al.*, 2019; Raupp *et al.*, 2020). Nos biomas brasileiros, as sementes recalcitrantes ocorrem em proporções maiores do que aquelas usadas em projetos de semeadura direta. Isso significa que a semeadura direta restringe a inclusão desse importante grupo funcional. Sementes recalcitrantes e outros grupos desejados, mas restringidos na semeadura direta, podem ser direcionados para o

plantio de mudas (Mangueira *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019; Passaretti *et al.*, 2020). Enfatizamos que a semeadura direta e o plantio de mudas não são métodos mutuamente exclusivos. Eles podem ser usados simultaneamente ou em etapas subsequentes para alcançar o objetivo da restauração ecológica. Por exemplo, o plantio de mudas pode enriquecer áreas previamente semeadas, enquanto a semeadura direta pode ser utilizada em conjunto com o plantio de mudas para acelerar a recuperação da vegetação. Essa estratégia combinada permite a otimização de recursos e a redução dos custos sistêmicos da restauração. Abordagens combinadas ou estratégias de cobertura de apostas têm sido sugeridas por outros estudos (Atondo-Bueno, Bonilla-Moheno & López-Barrera, 2018; Greet *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2023) para introduzir espécies ou grupos funcionais com maior desempenho ecológico-econômico por meio de um dos dois métodos alternativos.

## V. Conclusões

(1) Este estudo investigou as limitações da semeadura direta, desde a produção de sementes até o estabelecimento de plântulas, e propôs soluções para enfrentar esses desafios. A germinabilidade do lote de sementes e a emergência de plântulas juntas representaram 77% da perda total de sementes. Recomendamos melhorar a qualidade das sementes (ou considerar a baixa qualidade das sementes) e avaliar as decisões de manejo para aumentar a emergência de plântulas.

(2) Algumas espécies com porcentagem de estabelecimento de 1% ainda são adequadas para a semeadura direta após a consideração de  $E_{\text{germ}}$ ,  $E_g$  e  $E_{\text{US\$}}$ . Na restauração, a análise de custo-efetividade deve sempre ser usada para avaliar o sucesso de um método. Considerando o  $E_{\text{semente}}$ , o estabelecimento médio de plântulas na semeadura direta foi 13 vezes maior do que o observado em áreas naturais, e a semeadura direta foi economicamente mais vantajosa do que o plantio de mudas para 91% das espécies.

(3) Sugerimos o uso de múltiplas métricas para equalizar a densidade de semeadura, avaliar a relação custo-efetividade e possibilitar comparações com outros métodos de restauração, contribuindo assim para a pesquisa sobre o aumento do sucesso de estabelecimento. Ao mesmo tempo, ainda há uma oportunidade considerável para inovação nas técnicas de coleta, processamento, armazenamento, plantio e manutenção de sementes, a fim de melhorar a eficiência e abranger uma gama mais ampla da flora de espécies tropicais, como gramíneas, ervas, subarbustos, lianas e palmeiras.

## VI. Informações suplementares - Capítulo 1

Informações adicionais de suporte podem ser encontradas online na seção de Informações Suplementares ao final do Capítulo.

**Tabela S1.** Planilha Excel com as referências completas da pesquisa (referências).

**Tabela S2.** Planilha Excel com os metadados disponíveis para a referência 110 (referência 110).

**Tabela S3.** Planilha Excel com os metadados disponíveis para a referência 111 (referência 111).

**Tabela S4.** Planilha Excel com 226 espécies e as métricas de sucesso calculadas  $E_{\text{semente}}$ ,  $E_g$  e  $E_{\text{US\$}}$  (métricas  $E_{\text{semente}}$ ,  $E_g$  e  $E_{\text{US\$}}$ ).

**Tabela S5.** Planilha Excel com 146 espécies e a métrica de sucesso calculada  $E_{\text{germ}}$  (métrica  $E_{\text{germ}}$ ).

**Tabela S6.** Regressões de efeitos mistos lineares entre a germinabilidade do lote de sementes no laboratório ou viveiro, emergência e estabelecimento em campo aos 6, 12, 24 e 36 meses.

**Fig. S1.** Frequência de espécies em relação à germinabilidade do lote de sementes e ao estabelecimento em campo.

### Para download:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1cfMOqg3RLWffNqpgLTnDajsICfETnL2k/edit?usp=sharing&oid=103524157042346051163&rtpof=true&sd=true>

## **CAPÍTULO 2 - Aproveitando ao máximo as sementes nativas: as técnicas de manejo interagem com as características das sementes e plântulas para aumentar o sucesso da semeadura direta**



Para não desperdiçar as sementes tão valiosas, precisamos agir como agricultores cuidadosos. Separar as sementes em grupos de tamanho e forma é uma estratégia simples para garantir uma profundidade de enterramento ideal. Sementes médias, grandes e arredondadas devem ser enterradas primeiro e com uma camada de terra de até 2 cm. As sementes pequenas e achatadas devem ser semeadas depois, sobre a superfície ou enterradas com uma fina camada de terra, sempre menor que 0,5 cm. Sementes achatadas grandes, como as de tingui e guatambu-do-cerrado, se beneficiam do enterramento parcial, que pode ser feito colocando a semente sobre o solo e cobrindo apenas um dos lados da semente com terra. Aprendi bem cedinho com mãinha e vóinha que, para o enterramento não prejudicar o amendoim, arroz, gergelim, milho, feijão, abóbora, melancia, maxixe, caxi e cabaça, devemos sempre evitar o enterramento profundo demais. Mas cobrir com um pouco de terra é bom para evitar a dessecação e os danados bichos comedores de sementes. Os agricultores aprenderam essas coisas, passadas de geração em geração, na lida do reparo ou na prosa ao rabo do fogão a lenha. Precisamos transformar os restauradores em agricultores-cultivadores de campinas, cerrados, florestas, carrascos, caatingas, banhados, brejados e veredas. Tem muita coisa para se plantar aqui e acolá. Tem muita prosa boa para se contar, compartilhar e catirar. Para essa terra nunca se acabar, é preciso coragem, esperança e um cadinho de vontade. Vestir a terra com plantas é uma solução simples. Cuidar, cultivar e restaurar é preciso.

Este capítulo foi submetido na revista *Forest Ecology and Management* e foi considerado para Revisão Maior.



## Resumo

A semeadura direta é uma abordagem custo-efetiva para a restauração em larga escala, mas o estabelecimento de plântulas pode variar bastante entre espécies e regiões. Este estudo investigou como as técnicas de manejo usadas para processamento das sementes, preparação da área, semeadura e manejo pós-semeadura interagem com as características das sementes/plântulas e influenciam o sucesso da semeadura direta. Realizamos uma revisão sistemática da pesquisa feita no Brasil sobre semeadura direta, que abrange 26% dos estudos globais. Focamos em experimentos pareados entre técnicas de manejo e tratamentos de controle para analisar os percentuais de estabelecimento de plântulas de árvores, arbustos e palmeiras. As técnicas incluíram pré-embebição das sementes, superação de dormência das sementes, enterramento das sementes, aplicação de cobertura morta, fertilização do solo, consorciação com plantas de adubação verde ou culturas agrícolas, controle de plantas daninhas e semeadura na sombra de vegetação secundária. As características das sementes analisadas foram a massa fresca, teor de água e forma, e as características das plântulas foram morfologia funcional, guilda sucessional e guilda de vegetação, ou seja, floresta ou savana. Tratamentos de pré-germinação não ofereceram benefício significativo. O enterramento das sementes dobrou o estabelecimento, e a aplicação de cobertura morta só ajudou as sementes não enterradas. A fertilização orgânica reduziu o estabelecimento para espécies de savana, enquanto a consorciação com plantas de adubo verde ou culturas agrícolas aumentou o estabelecimento para espécies de floresta. A eficácia do controle de plantas daninhas dependeu das características funcionais. A roçada favoreceu espécies pioneiras, enquanto a capina mecânica ou química beneficiou plântulas de sementes grandes e plântulas com cotilédones foliáceos. O estabelecimento de espécies pioneiras foi de 15% a pleno sol e 3% à sombra, enquanto espécies clímax tolerantes à sombra estabeleceram-se em 8% a pleno sol e 28% à sombra. Implementando técnicas de manejo, o sucesso da semeadura direta pode ser aumentado em até quatro vezes. Isso se traduz em potencial redução no uso de sementes de 25% a 75%, o principal custo da semeadura direta. Esses achados abrem caminho para esforços de restauração mais custo-efetivos e com melhores percentuais de estabelecimento de plântulas.

**Palavras-chave:** Estabelecimento de plântulas; Espécies arbóreas tropicais; Função cotiledonar; Massa das sementes; Restauração custo-efetiva; Restauração ecológica; Semeadura direta; Teor de água das sementes.

## **Abstract**

Direct seeding offers a cost-effective approach to large-scale restoration, but seedling establishment can vary greatly across species and regions. This study investigates how management techniques used for seed processing, site preparation, seeding, and post-seeding management interact with seed/seedling traits and influence direct seeding success. We conducted a systematic review of Brazilian direct seeding research, encompassing 26% of global studies. We focused on paired experiments comparing management techniques against control treatments to analyze seedling establishment rates for trees, shrubs, and palms. The techniques included pre-soaking seeds, overcoming seed dormancy, seed burial, mulch application, soil fertilization, intercropping with green manure or agricultural crops, weed control, and sowing in the shade of secondary vegetation. Seed traits were fresh mass, water content, and shape, and seedling traits were functional morphology, successional guild, and vegetation guild, *i.e.*, forest or savanna. Pre-germination treatments offered no significant benefit. Seed burial doubled establishment, and mulch application only aided unburied seeds. Organic fertilization reduced establishment for savanna species, while intercropping with green manure or crops enhanced establishment for forest species. Weed control effectiveness depended on functional traits. Mowing favored pioneers, while hoeing or herbicide application benefited large-seeded and epigeal-foliaceous-cotyledon seedlings. Pioneer species establishment was 15% in full sun and 3% in the shade, while shade-tolerant climax species established at 8% in full sun and 28% in the shade. By implementing management techniques, direct seeding success can be increased up to fourfold. This translates to a potential reduction in seed usage, the primary cost of direct seeding, by 25% to 75%. These findings pave the way for cost-effective restoration efforts with improved seedling establishment rates.

**Keywords:** Direct sowing; Cost-effective restoration; Cotyledon function; Ecological restoration; Seed mass; Seed moisture content; Seedling establishment; Tropical tree species.

## I. Introdução

A semeadura direta surgiu como uma técnica promissora para a restauração de ecossistemas degradados devido à sua relação custo-benefício e eficiência operacional em grandes escalas (Campos-Filho *et al.*, 2013; Raupp *et al.*, 2020). Ela é amplamente utilizada na restauração de campos, savanas e florestas tropicais, possibilitando a reintrodução de uma ampla variedade de espécies vegetais, incluindo árvores, arbustos, palmeiras e gramíneas (Campos-Filho *et al.*, 2013; Pellizzaro *et al.*, 2017; Figueiredo *et al.*, 2021). A versatilidade da semeadura direta permite sua aplicação em projetos de restauração em área total (Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019) e para o enriquecimento de áreas em regeneração natural (Bonilla-Moheno & Holl, 2010; Cole *et al.*, 2011). A semeadura direta tem sido notavelmente bem-sucedida em alcançar os objetivos de restauração florestal, evidenciada pelo rápido fechamento do dossel, alta riqueza de espécies e densa regeneração de árvores no sub-bosque em poucos anos (Freitas *et al.*, 2019; Aragão *et al.*, 2023).

Embora a semeadura direta seja eficaz (Doust *et al.*, 2006; Campos-Filho *et al.*, 2013; Pellizzaro *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019) e tenha um bom custo-benefício (Raupp *et al.*, 2020), existe uma alta variabilidade no sucesso de estabelecimento de plântulas (número de plântulas de 1 ano de idade dividido pelo número de sementes semeadas) entre espécies e áreas, e, conseqüentemente, no sucesso da restauração (Ceccon *et al.*, 2016; Souza & Engel, 2023). Foi demonstrado que 47% das falhas no estabelecimento de plântulas na semeadura direta se devem a sementes inviáveis. Além disso, das sementes viáveis, 57% não emergem como plântulas; e das plântulas que emergem, 43% não sobrevivem até um ano de idade (análise de 333 espécies de árvores, arbustos e palmeiras tropicais; Ferreira e Vieira, em revisão).

Intervenções de manejo podem ser implementadas para minimizar as perdas de sementes e plântulas em cada fase de estabelecimento, aumentando a probabilidade de uma transição bem-sucedida para a próxima fase e, conseqüentemente, melhorando o sucesso geral do estabelecimento em campo. Essas intervenções incluem (i) a coleta de sementes após a maturidade fisiológica e seu armazenamento em condições adequadas, (ii) a preparação do solo para eliminar plantas daninhas, desfazer torrões e afogar o solo, a fim de melhorar o contato entre a semente e o solo e facilitar o desenvolvimento das raízes (Ferreira *et al.*, 2023), (iii) aplicar tratamentos pré-germinativos apenas quando necessário (Correia *et al.*, 2022), (iv) semeadura apenas sob condições de umidade do

solo estáveis (Shaw *et al.*, 2020) e (v) a uma profundidade precisa para equilibrar a proteção contra a predação e a desidratação com a emergência bem-sucedida (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006), (vi) aplicar cobertura morta para manter a umidade do solo e suprimir a germinação de plantas daninhas (Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017), (vii) corrigir deficiências de fertilidade do solo quando necessário (Silva *et al.*, 2015), (viii) consorcio com plantas de cobertura de crescimento rápido (agrícolas ou nativas) para mitigar flutuações extremas de temperatura e umidade (Silva *et al.*, 2015), (ix) realizar a capina pós-semeadura (Passaretti *et al.*, 2020), e (x) semear sementes em um ambiente luz adequado para grupos sucessionais específicos (Camargo *et al.*, 2002).

As técnicas de manejo interagem com as características das sementes e plântulas, influenciando o sucesso do estabelecimento (Doust *et al.*, 2006; Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017). Por exemplo, (i) tratamentos para quebra da dormência podem não ser favoráveis para várias espécies na semeadura direta, uma vez que a germinação lenta e assíncrona é eficaz em evitar a exposição de sementes embebidas e plântulas a condições desfavoráveis de temperatura, umidade ou herbivoria (Correia *et al.*, 2022; Laumann *et al.*, 2023). Por outro lado, superar a dormência pode beneficiar espécies pioneiras que precisam emergir e cobrir rapidamente o solo para escapar do sombreamento excessivo de plantas daninhas ou de cobertura (Correia *et al.*, 2022).

Enterrar sementes e aplicar cobertura morta previne a predação e modera as flutuações de temperatura e umidade do solo (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006). Por outro lado, sementes muito pequenas e planas podem ter dificuldade em emergir sob essas condições (Jurado & Westoby, 1992; Bond, Honig & Maze, 1999; Doust *et al.*, 2006).

Plantas de cobertura de crescimento rápido atuam como pioneiras de vida curta e facilitam o estabelecimento de espécies florestais não pioneiras (Holl, 2002; Campos-Filho *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2019). No entanto, elas podem reduzir ou até inibir o estabelecimento de espécies florestais pioneiras e espécies de savanas que requerem pleno sol para emergir e sobreviver (Doust, Erskine & Lamb, 2008; Silva *et al.*, 2015). A semeadura em pleno sol favorece espécies pioneiras, secundárias e de sementes secas adaptadas às flutuações de umidade e temperatura encontradas em áreas abertas (Camargo *et al.*, 2002; Hooper, Condit & Legendre, 2002; Doust *et al.*, 2008; Cole *et al.*, 2011). Por outro lado, espécies clímax tolerantes à sombra com sementes úmidas são menos suscetíveis às condições de áreas abertas e podem se beneficiar da sombra para seu estabelecimento (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Doust *et al.*, 2008; Cole

*et al.*, 2011). A consideração cuidadosa dessas interações é crucial para selecionar e personalizar técnicas para diferentes grupos funcionais, a fim de aumentar o sucesso do estabelecimento de plântulas em projetos de restauração por semeadura direta (Tabela 1).

Realizamos uma revisão sistemática da literatura disponível sobre experimentos de semeadura direta para entender a eficácia das técnicas de manejo aplicadas à semeadura direta e como elas interagem com as características funcionais das sementes e plântulas. Nosso objetivo foi avaliar (i) como o estabelecimento de plântulas é afetado por tratamentos pré-germinativos, profundidade de semeadura, aplicação de cobertura morta, fertilização do solo, consórcio com plantas de cobertura de crescimento rápido, controle de plantas daninhas e ambiente de luz em que a semeadura direta foi realizada, e (ii) como cada técnica de manejo interage com as características funcionais das sementes e plântulas (veja as hipóteses na Tabela 1). Os resultados têm implicações para aumentar a relação custo-efetividade da restauração por semeadura direta. Restringimos nossa revisão a estudos realizados no Brasil, que representa 26% dos estudos globais e onde temos ampla experiência em campo e coletamos uma parte significativa dos dados.

**Tabela 1:** Técnicas de manejo para restauração por semeadura direta, características funcionais ou de história de vida de sementes e plântulas, e hipóteses sobre como elas interagem para afetar a emergência e a sobrevivência das plântulas e, portanto, o sucesso do estabelecimento das plântulas.

Técnicas de manejo	Hipóteses
Tratamentos pré-germinativos × guilda sucessional	A aplicação de tratamentos pré-germinativos (pré-embebição, quebra de dormência e remoção do endocarpo preso às sementes) geralmente é prejudicial na semeadura direta (Correia <i>et al.</i> , 2022; Laumann <i>et al.</i> , 2023). No entanto, as espécies pioneiras com dormência devem ter sua dormência quebrada para emergir e se estabelecer rapidamente, aproveitando o pleno sol (Garwood, 1983; Donohue <i>et al.</i> , 2010).
Profundidade de enterramento x Tamanho da semente x Formato da semente x Teor de água da semente x Tipo de plântula	Enterrar as sementes geralmente é benéfico, especialmente para sementes grandes, redondas, úmidas e com cotilédones de reserva (Woods & Elliott, 2004; Doust <i>et al.</i> , 2006; Silva & Vieira, 2017). No entanto, sementes pequenas e achatadas e plântulas com cotilédones foliáceos têm a emergência reduzida quando enterradas (Jurado & Westoby, 1992; Bond <i>et al.</i> , 1999; Doust <i>et al.</i> , 2006).
Cobertura vegetal × Profundidade de enterramento × Tamanho da semente × Forma da semente × Tipo de plântula	Cobrir as sementes com cobertura morta geralmente é benéfico, especialmente para sementes médias e grandes (Woods & Elliott, 2004; Doust <i>et al.</i> , 2006; Silva & Vieira, 2017). No entanto, as sementes pequenas e achatadas e as plântulas com cotilédones foliáceos têm emergência reduzida sob cobertura morta (Doust <i>et al.</i> , 2006; Mollard, Naeth & Cohen-Fernandez, 2014;

Silva & Vieira, 2017). A cobertura morta e a profundidade de enterramento devem ser consideradas em conjunto por seus efeitos combinados na emergência das plântulas.

Fertilização do solo × Guilda de vegetação

A fertilização do solo é geralmente benéfica na sementeira direta. Espera-se que a fertilização aumente o estabelecimento de espécies florestais (Rodrigues *et al.*, 2009; Campoe *et al.*, 2014). No entanto, a fertilização pode reduzir o estabelecimento de espécies de savana, pois elas são adaptadas a solos ácidos e menos férteis, e também porque as plantas daninhas se beneficiam da fertilização (Martinotto *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015).

Plantas de cobertura de crescimento rápido × Guilda sucessional × Guilda de vegetação

O consórcio com plantas de cobertura de crescimento rápido geralmente é benéfico, especialmente para espécies florestais não pioneiras (Campos-Filho *et al.*, 2013; Reis *et al.*, 2019). No entanto, as espécies florestais pioneiras e as espécies de savana podem apresentar um estabelecimento reduzido (Silva *et al.*, 2015; Ferreira MC, observação pessoal).

Controle de plantas daninhas × Tamanho da semente × Guilda sucessional × Tipo plântula

O controle de plantas daninhas é benéfico, especialmente para espécies com sementes pequenas, espécies pioneiras e plântulas com cotilédones foliáceos (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020; Piotrowski *et al.*, 2023). Espera-se que a capina química ou mecânica seja mais eficaz do que a roçada (Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020).

Ambiente de luz × Teor de água da semente × Guilda sucessional × Tipo de plântula

A semeadura a pleno sol geralmente é benéfica. Espera-se que a semeadura direta a pleno sol aumente o estabelecimento de espécies pioneiras com sementes secas (ortodoxas) e com plântulas epígeo-foliáceas (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Doust *et al.*, 2008). No entanto, espera-se que a semeadura sob a sombra aumente o estabelecimento de espécies clímax tolerantes à sombra, que têm sementes úmidas (recalcitrantes) e plântulas hipógeo-reserva (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Cole *et al.*, 2011).

---



## II. Materiais e métodos

### (1) Pesquisa e seleção de literatura

Pesquisamos nos bancos de dados Web of Science, Scopus e Google Scholar com a combinação dos termos (“direct seeding” OR “direct sowing”) AND “restoration” AND “Brazil” (também em português: “semeadura direta” ou “plantio mecanizado” e “restauração” e “Brasil”), para encontrar estudos de semeadura direta para restauração em área total ou enriquecimento realizados no Brasil. Realizamos a pesquisa em janeiro de 2022 e incluímos todos os estudos até dezembro de 2021. Foram incluídos artigos revisados por pares em inglês ou português, capítulos de livros, dissertações de mestrado, teses de doutorado e monografias de graduação. Incluímos a literatura cinza porque ela (i) traz os estudos publicados em português que muitas vezes não são submetidos para publicação em periódicos internacionais e (ii) evita o viés de amostragem para resultados positivos.

Encontramos 87 estudos, o mais antigo foi publicado em 1995. Pesquisamos nas 87 seções de referência em busca de citações de estudos não encontrados pelos termos de pesquisa e, assim, encontramos 13 estudos adicionais, totalizando 100. Incluímos dois estudos do nosso grupo de pesquisa que ainda não foram publicados. Fizemos a mesma busca sem restringir o país e encontramos mais nove estudos realizados na região neotropical com espécies que também ocorrem no Brasil. Essa pesquisa complementar foi importante para incluir algumas espécies e aumentar o número de observações de espécies na Amazônia brasileira. Chegamos a um total de 111 estudos (Tabela S1), incluindo 64 artigos revisados por pares, 29 dissertações de mestrado (três dissertações tinham dois experimentos diferentes, e cada experimento independente foi considerado um estudo), seis monografias de graduação, seis teses de doutorado, um capítulo de livro e dois experimentos com dados não publicados. A descrição dos métodos e os metadados dos experimentos não publicados estão disponíveis na íntegra (Tabela S2, S3). Quando um artigo publicado resultou de uma dissertação ou tese, usamos o artigo e citamos a dissertação ou tese como uma referência adicional (Tabela S1).

Nossa revisão se concentrou em estudos que empregaram a semeadura direta para restaurar áreas sem vegetação nativa, áreas degradadas ou para enriquecer áreas de vegetação secundária. Restringimos nossa análise a espécies de árvores, arbustos e palmeiras. As ervas foram excluídas porque foram avaliadas principalmente com base na cobertura do solo gerada por uma quantidade de sementes semeadas, sem dados sobre a

emergência, a sobrevivência e o estabelecimento das plântulas, que foram parâmetros cruciais para este estudo. Também excluímos espécies exóticas e cultivares frequentemente semeadas junto com espécies nativas. Não incluímos espécies que apresentaram germinabilidade nula no laboratório (ou viveiro; teste de viabilidade) e simultaneamente porcentagem de estabelecimento nula no campo, pois esses resultados indicaram que as sementes semeadas eram inviáveis. Somente os estudos que relataram a emergência, o estabelecimento ou ambos de cada espécie foram considerados em nossas análises. Entramos em contato com os autores de três estudos para esclarecer informações ausentes ou conflitantes, e eles gentilmente forneceram os detalhes necessários.

## **(2) Extração e curadoria de dados**

Extraímos dos estudos os nomes das espécies (atualizados de acordo com a Flora e a Funga do Brasil 2023; <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>), a porcentagem de germinação do lote no laboratório ou no viveiro (controle de viabilidade das sementes), a emergência no campo (número total de plântulas emergidas/número de sementes semeadas  $\times$  100) e o estabelecimento das plântulas no campo (número de plantas vivas no tempo T/número de sementes semeadas  $\times$  100).

Os estudos verificaram o estabelecimento no campo aos 3, 6, 12, 18, 24 e 36 meses após a semeadura. Os estudos relataram porcentagens de emergência e/ou estabelecimento, sendo que a maioria apresentou emergência e estabelecimento aos seis e/ou 12 e/ou 24 meses. Extraímos essas informações de textos, tabelas, figuras ou arquivos suplementares. Quando necessário, usamos o WebPlotDigitizer 4.6 (<https://apps.automeris.io/wpd/>) para extrair com precisão os dados das figuras. Também anotamos os tratamentos específicos testados para cada espécie em cada estudo, as coordenadas geográficas, o uso da terra e o tipo de cobertura antes da semeadura, a precipitação, o tipo de solo, a vegetação original, o método de semeadura (área total ou enriquecimento), o tipo de semeadura (a lanço, em linha ou em covas), o preparo do solo e o controle de plantas daninhas após a semeadura.

## **(3) Preparação da variável de resposta: porcentagem de estabelecimento aos 12 meses**

Padronizamos todas as observações de estabelecimento para 12 meses. O período de estabelecimento de 12 meses é o período de avaliação mais comum no conjunto de dados, com sessenta por cento das observações registradas nesse período. Para as observações restantes, ajustamos equações lineares com base em todo o conjunto de dados

para extrapolar ou interpolar cada observação para 12 meses (análise para 333 espécies de árvores, arbustos e palmeiras tropicais; Ferreira e Vieira, em revisão). Esse procedimento visava corrigir a superestimação do estabelecimento a partir de observações anteriores a 12 meses e a subestimação a partir de observações posteriores a 12 meses.

#### **(4) Seleção de técnicas de manejo preditoras**

Com base em estudos anteriores, selecionamos dez técnicas de manejo que podem aumentar o estabelecimento de espécies na semeadura direta. Pesquisamos no banco de dados estudos que aplicaram e não aplicaram simultaneamente uma dessas técnicas no mesmo experimento. Entre os estudos selecionados, 154 espécies (124 de florestas e 30 de savanas) atenderam a essas condições. Esses critérios permitiram o uso de controles estatísticos por espécie e por estudo para avaliar o efeito de cada técnica.

As técnicas de manejo foram (referências na Tabela S4): (1) pré-embebição das sementes em água antes da semeadura (sem ou com), (2) quebra de dormência das sementes ou extração das sementes do interior de frutos (quando a semente e fruto são a unidade de propagação) que retardam a embebição (sem ou com), (3) enterramento das sementes (na superfície ou enterradas), (4) aplicação de cobertura morta (*Mulch* com material vegetal; sem ou com), (5) fertilização química (sem ou com), (6) fertilização orgânica (sem ou com), (7) consórcio com plantas agrícolas ou de adubação verde de crescimento rápido (sem ou com), (8) roçada de plantas daninhas (remoção da biomassa acima do solo; sem ou com), (9) capina química ou mecânica de plantas daninhas (remoção ou morte da planta inteira; sem ou com), (10) ambiente de luz no momento da semeadura direta (a pleno sol ou à sombra da vegetação secundária).

As espécies não estabelecidas em ambos os tratamentos (sem ou com a técnica de manejo) foram excluídas da análise para evitar contagens de zero inflado, não normalidade e heterocedasticidade. A condição de duplo zero apareceu apenas 12 vezes, e estava associado a lotes de sementes de baixa germinabilidade ou que foram incorretamente armazenados (análise para 333 espécies de árvores, arbustos e palmeiras tropicais; Ferreira e Vieira, em revisão). Os estudos de fertilização química e orgânica disponíveis incluíram apenas espécies de savana, restringindo a interpretação às savanas. Para a variável ambiente de luz, os estudos disponíveis incluíram apenas espécies florestais, limitando a interpretação às florestas. Além disso, utilizamos dois estudos (de um total de 11) que usaram sombreamento artificial para contrastar com a semeadura a

pleno sol. Em ambos os casos, o nível de sombreamento aplicado foi baseado na média da vegetação secundária próxima.

### **(5) Seleção de características funcionais preditoras**

Com base em estudos anteriores (consulte a Tabela 1), selecionamos características de sementes e plântulas que podem interagir com técnicas de manejo para influenciar o estabelecimento de espécies na restauração por semeadura direta. As características selecionadas foram: (1) massa fresca da semente, (2) teor de água da semente, (3) forma da semente, (4) morfologia funcional da plântula, (5) guilda sucessional e (6) guilda de vegetação (detalhes na Tabela 2). Usamos a massa fresca da semente porque os dados sobre a massa seca eram escassos para a maioria das espécies. Quando possível, buscamos as características de cada espécie na literatura (Tabelas S5, S6 e S7). Pesquisamos no *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* os termos ligados às características, nomes de espécies e seus sinônimos botânicos. Para as espécies sem informações na literatura, adquirimos sementes de produtores de sementes e medimos as características no Laboratório de Fisiologia de Sementes da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, DF (Tabela S8).

### **(6) Análise de dados**

Avaliamos como o estabelecimento foi afetado por cada técnica de manejo individualmente (descrito na seção 2.4) e também avaliamos sua interação com as seis características de sementes e plântulas (descrito na seção 2.5). A identidade do estudo e da espécie foram adicionadas como efeitos aleatórios usando modelos lineares de efeitos mistos. Começamos com um modelo completo contendo seis interações e realizamos uma seleção de modelos passo a passo para trás (*backward stepwise model selection*). A cada rodada, removemos a variável não significativa que menos contribuiu para o modelo, e a significância foi avaliada usando a função “Drop1” do pacote *Lmtest*. Quando houve uma interação significativa entre uma técnica de manejo e uma característica, comparamos cada categoria de característica (por exemplo, as guildas de luz pioneira, secundária e clímax) sem ou com manejo. Quando a característica era uma variável contínua e apresentava uma interação significativa com uma técnica de manejo, nós a classificamos em categorias para análises a posteriori; em seguida, comparamos o estabelecimento de cada categoria de característica sem ou com manejo. Extraímos os tamanhos dos efeitos na escala natural usando o pacote *lsmeans*. Primeiro apresentamos o efeito geral, seguido pelo efeito de interação quando houve uma interação significativa. Os modelos mostraram

resíduos homogêneos e normalmente distribuídos. A interação entre duas técnicas de manejo no estabelecimento foi avaliada para aplicação de cobertura morta (sem ou com) e profundidade de semeadura (na superfície ou enterrada), pois todos os estudos que aplicaram cobertura morta também testaram a semeadura na superfície ou enterrada. Todas as análises foram realizadas no R (R Core Team, 2024).

**Tabela 2:** Características funcionais ou da história de vida de sementes e plântulas, unidades de medida e descrições das características.

<b>Característica</b>	<b>Descrição</b>
Massa fresca da semente (mg)	Semente ou propágulo, quando o fruto e a semente são uma unidade inseparável. Foi testado em uma escala logarítmica. Ela variou de 1,68 a 28.105,96 mg nas espécies estudadas.
Teor de água da semente (%)	As sementes com baixo teor de água (sementes secas) são geralmente ortodoxas. As sementes com alto teor de água (sementes úmidas) são geralmente recalcitrantes. O teor de água variou de 6 a 68% nas espécies estudadas.
Forma da semente (sem dimensão)	Semente ou propágulo, quando o fruto e a semente são uma unidade inseparável. Variância no comprimento, largura e espessura da semente após a divisão de todos os valores pelo comprimento da semente. Ela variou de 0,00 a 0,31 nas espécies estudadas.
Morfologia funcional da plântula (Categórica)	Há seis tipos morfofuncionais de plântulas com base na exposição, posição e função dos cotilédones (Pérez-Harguindeguy et al., 2013). As plântulas podem ser: (i) fanerocotiledonar-hipógea-foliácea (FHF), um tipo raro que ocorre em savanas e florestas tropicais secas; (ii) fanerocotiledonar-epígea-foliácea (FEF); (iii) fanerocotiledonar-hipógea-reserva (FHR); (iv) fanerocotiledonar-epígea-reserva (FER); (v) criptocotilenonar-hipógea-reserva (CHR); (vi) criptocotilenonar-epígea-reserva (CER), um tipo raro que ocorre em florestas

tropicais chuvosas. Os tipos FHF e CER não foram analisados neste estudo porque foram representados por apenas duas e uma espécie, respectivamente.

Guilda sucessional  
(Categórica)

As plantas tropicais podem ser divididas em quatro guildas sucessionais com base na abundância da população em regeneração, na taxa de crescimento, no tempo de vida e no ambiente de luz necessário para a regeneração. As guildas são (i) Pioneiras: Regeneram-se com populações abundantes, têm crescimento rápido, vivem poucas décadas e regeneram-se a pleno sol; (ii) Espécies secundárias: Regeneram-se com populações abundantes, têm crescimento rápido a moderado, vivem por muitas décadas e regeneram-se em ambientes de pleno sol ou parcialmente sombreados; (iii) Espécies clímax exigentes de luz: Regeneram-se com populações esparsas, têm crescimento moderado a lento, vivem por muitas décadas a séculos e regeneram-se em ambientes de pleno sol ou parcialmente sombreados, muitas vezes tornando-se emergentes acima do dossel; (iv) Espécies clímax tolerantes à sombra: Regeneram-se com populações esparsas, têm crescimento moderado a lento, vivem por muitas décadas a séculos e regeneram-se em ambientes parcialmente ou totalmente sombreados até atingir o dossel.

Guilda vegetacional  
(Categórica)

As guildas de vegetação são floresta tropical ou savana tropical. A classificação foi baseada na área de ocorrência (<https://floradobrasil.jbrj.gov.br>), no número de ocorrências (<https://specieslink.net>) e na literatura.

### III. Resultados

Quatro técnicas de manejo afetaram o estabelecimento das plântulas, e sete afetaram o estabelecimento por meio de interações com as características funcionais das espécies (veja as estatísticas na Tabela S9). As interações alteraram a direção ou a magnitude dos efeitos (Fig. 1). A pré-embebição das sementes em água antes da semeadura direta não afetou o estabelecimento. A superação da dormência também não afetou o estabelecimento. Embora não tenha afetado significativamente o estabelecimento de nenhuma guilda sucessional, a direção do efeito foi positiva para as pioneiras e negativa para as espécies clímax exigentes de luz, resultando em uma interação significativa (Tabela S9).

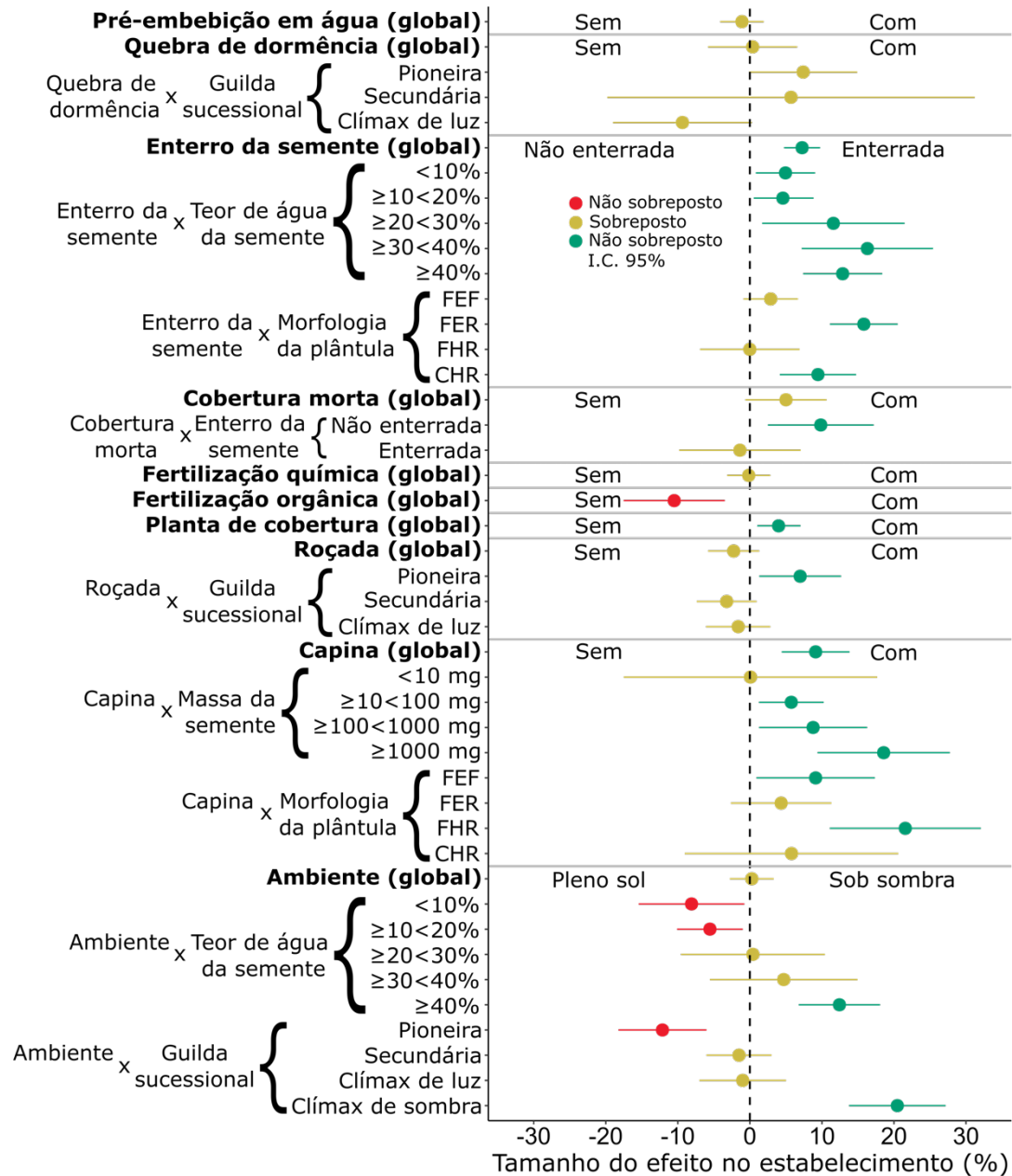
As sementes enterradas tiveram o dobro de porcentagem de estabelecimento em comparação com as sementes não enterradas (14% vs. 7%). No entanto, houve uma interação com o teor de água das sementes e a morfologia das plântulas. As sementes com maior teor de água se beneficiaram mais do enterramento do que as sementes com menor teor de água. Enterrar as sementes foi significativamente benéfico para as plântulas FER e CHR (Fig. 1).

A aplicação de cobertura morta sobre o solo foi benéfica somente quando as sementes não estavam enterradas (Fig. 1). A fertilização química não afetou significativamente o estabelecimento, enquanto a fertilização orgânica afetou negativamente o estabelecimento (Fig. 1). O consórcio com espécies de cobertura de crescimento rápido foi favorável ao estabelecimento (Fig. 1).

A roçada de plantas daninhas foi benéfica apenas para o estabelecimento de espécies pioneiras (Fig. 1). A capina mecânica e/ou química dobrou a porcentagem geral de estabelecimento (9% sem vs. 18% com capina). Além disso, houve interação com a massa de sementes e o tipo de plântula, mostrando um efeito positivo para sementes maiores e para plântulas FEF e FHR (Fig. 1).

O ambiente de pleno sol foi benéfico para sementes com teor de água <20% e desfavorável para sementes com teor de água >40%. Da mesma forma, as espécies pioneiras tiveram uma porcentagem de estabelecimento 12% maior a pleno sol (15% a pleno sol vs. 3% sob a copa das árvores), enquanto as espécies clímax tolerantes à sombra tiveram uma porcentagem de estabelecimento 20% maior à sombra (8% a pleno sol vs. 28% à sombra; Fig. 1).





**Figura 1:** Tamanhos de efeito no estabelecimento de plântulas para as dez técnicas de manejo empregadas na semeadura direta e suas interações com características funcionais de sementes e plântulas. As classes de massa de sementes e teor de água foram classificadas após a análise da variável contínua, se significativa. Os tipos morfofuncionais de plântulas são: fanerocotiledonar-epígea-foliácea (FEF), fanerocotiledonar-epígea-reserva (FER), fanerocotiledonar-hipógea-reserva (FHR) e criptocotilenonar-hipógea-reserva (CHR).

#### IV. Discussão

Esta é a mais extensa revisão sistemática da semeadura direta realizada no Brasil e no mundo. Nela, analisamos como o estabelecimento de plântulas no campo foi afetado pelas técnicas de manejo e avaliamos suas interações com as características funcionais

das sementes e plântulas e como elas modificam a direção ou a magnitude dos efeitos. Descobrimos que algumas técnicas de manejo, como os tratamentos pré-germinativos, não aumentaram o sucesso de estabelecimento, enquanto outras técnicas melhoraram substancialmente o sucesso de estabelecimento, como o enterramento de sementes ou o controle de plantas daninhas após a semeadura. A maioria das técnicas interagem com as características das sementes ou das plântulas e devem ser aplicadas de forma personalizada aos grupos funcionais que se beneficiam de sua aplicação. Mostramos que técnicas de manejo eficazes direcionadas a grupos funcionais específicos podem aumentar em quatro vezes o sucesso da semeadura direta, reduzindo potencialmente a densidade de sementes semeadas entre 25% e 75%. A redução da densidade de sementes semeadas diminui os custos da restauração com semeadura direta, pois as sementes representam metade dos custos do método (Raupp *et al.*, 2020).

### **(1) Os tratamentos de pré-germinação usados em laboratório ou viveiro não devem ser adotados automaticamente na semeadura direta**

A pré-embebição das sementes em água à temperatura ambiente não afetou o estabelecimento. A imersão de sementes em água (2 a 48 horas, dependendo da espécie) é usada rotineiramente em laboratórios e viveiros para acelerar e sincronizar a germinação de espécies com dormência física fraca ou espécies não-dormentes que germinam lentamente (Mori, Piña-Rodrigues & Freitas, 2012; Barbedo & Santos Júnior, 2018; Albuquerque *et al.*, 2022). Seu uso aumenta os custos da semeadura direta (Correia *et al.*, 2022). Além disso, observamos alta mortalidade de sementes (por exemplo, *Anadenanthera colubrina*, *Astronium urundeuva*, *Luehea paniculata*, *Senegalia polyphylla*, *Piptadenia gonoacantha* e *Vernonanthura brasiliiana*) depois que as sementes foram imersas em água fria por 2 horas e passaram por um veranico após serem semeadas no campo (Ferreira MC, observação pessoal). Veranicos são esperados em ecossistemas sazonais, mas sua frequência e tempo de duração tem aumentado com as mudanças climáticas. Portanto, atrasar o início da embebição ou retardar a embebição é uma solução natural que protege as sementes da dessecação (Laumann *et al.*, 2023). Portanto, não recomendamos o pré-embebição das sementes antes da semeadura direta.

Não houve efeito significativo da quebra de dormência no estabelecimento das plântulas. Entretanto, a direção do efeito foi negativa para as espécies clímax exigentes de luz e positiva para as espécies pioneiras. A quebra de dormência e a extração das sementes de frutos fortemente aderidos que retardam a embebição, são técnicas

recomendadas para condições de laboratório ou viveiro para acelerar e sincronizar a germinação e reduzir o tamanho dos propágulos para que caibam nos recipientes de germinação (Merritt & Dixon, 2011; Pedrol *et al.*, 2018). Evitar a quebra de dormência na sementeira direta é vantajoso para manter a germinação assíncrona e espalhar os riscos de mortalidade em massa devido a veranicos e herbivoria (Garwood, 1983; Simons & Johnston, 2006; Borghetti *et al.*, 2019). Por outro lado, a quebra da dormência pode aumentar o estabelecimento de espécies pioneiras, que precisam germinar e se estabelecer em condições de dossel aberto e menor competição por luz (Garwood, 1983; Válio & Scarpa, 2001b; Donohue *et al.*, 2010). Essas condições duram apenas alguns meses devido à rápida cobertura do solo promovida por plantas daninhas ou plantas de cobertura (Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020; Correia *et al.*, 2022). No entanto, como não houve diferença significativa entre as sementes intactas e as pré-tratadas, recomendamos mais experimentos de campo para avaliar o custo-benefício da quebra de dormência para cada espécie, grupo ecológico e região bioclimática.

## **(2) Enterrar sementes é uma técnica altamente eficaz**

O estabelecimento geral aumentou de 7% para 14% quando as sementes foram enterradas e de 5% para 21% para sementes com mais de 30% de teor de água e para plântulas de FER. Sementes grandes, redondas, úmidas e com reservas cotiledonares têm menos dificuldade para emergir quando enterradas, além de se beneficiarem da proteção contra predadores e das flutuações de umidade e temperatura sob o solo (Jurado & Westoby, 1992; Bond *et al.*, 1999; Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006; Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017). As sementes com maior teor de água tiveram um estabelecimento reduzido em pleno sol, provavelmente devido à dessecação. Portanto, enterrar as sementes é uma solução simples e econômica para evitar a dessecação das sementes no campo (Woods & Elliott, 2004; Vieira & Scariot, 2006a).

O maior estabelecimento de plântulas FER e CHR quando enterradas pode ser explicado por sua capacidade de superar a barreira física de uma camada de solo devido às suas altas reservas de energia que lhes permitem alongar o hipocótilo (para germinação epigea) ou o epicótilo (para germinação hipógea) (Garwood, 1983; Woods & Elliott, 2004; Tunjai & Elliott, 2012). Por outro lado, enterrar as sementes não foi benéfico para as plântulas de FHR e FEF, possivelmente porque seus cotilédones precisam se abrir e expandir durante a emergência, encontrando resistência do solo (Ferreira e Vieira, em preparação). As plântulas de FHR e FEF estão associadas a sementes planas e pequenas,

respectivamente, que emergem melhor quando semeadas na superfície ou sob uma fina camada de solo (Jurado & Westoby, 1992; Bond *et al.*, 1999; Doust *et al.*, 2006). Nos estudos analisados, o enterramento foi realizado em profundidades rasas e precisas (variando de 1 a 3 cm). No entanto, na semeadura direta em escala operacional, enterrar sementes planas e pequenas com plântulas de FHR e FEF pode prejudicar a emergência das plântulas, pois o enterro é feito com grade ou enxada, podendo atingir profundidades superiores a 5 cm (Campos-Filho *et al.*, 2013; Shaw *et al.*, 2020). A precisão no enterramento pode ser aumentada com a adaptação de implementos agrícolas ou com a adoção de procedimentos mais cuidadosos ao incorporar as sementes ao solo. O desenvolvimento de implementos específicos para a semeadura direta de espécies nativas pode melhorar a precisão do enterro de sementes em larga escala.

### **(3) A cobertura morta é uma técnica complementar ao enterro preciso de sementes**

A cobertura de palhada morta aumentou o estabelecimento de sementes não enterradas. A cobertura morta melhora o estabelecimento ao reduzir as flutuações de temperatura na superfície do solo, manter a umidade e inibir a germinação de plantas daninhas (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017). Para as sementes enterradas, o enterramento sozinho provavelmente foi suficiente para garantir a emergência e a sobrevivência das plântulas. A cobertura morta não interagiu com as características das sementes e das plântulas, conforme esperado pela literatura (Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017), possivelmente porque a camada de cobertura morta usada na maioria dos estudos era fina ( $\leq 5$  cm) e não apresentava uma forte resistência física à emergência (Silva & Vieira, 2017). Sementes pequenas, planas e plântulas epígeo-foliáceas podem ter dificuldade para emergir sob camadas espessas (Doust *et al.*, 2006; Mollard *et al.*, 2014; Silva & Vieira, 2017). Um dos estudos analisados aplicou diferentes espessuras de cobertura de palhada morta e constatou a inibição da emergência de espécies nativas a partir de 7 cm (Oliveira, 2011). A cobertura morta é fácil de aplicar na semeadura em linhas ou covas, pois ela pode ser cortada e colhida nas entrelinhas.

### **(4) A fertilização reduz o estabelecimento de espécies de savana**

A fertilização orgânica reduziu o estabelecimento geral das espécies de savana. As espécies de savana podem até mesmo apresentar uma diminuição no crescimento e na sobrevivência em solos fertilizados devido à interação positiva entre a fertilização e a agressividade das plantas daninhas (Martinotto *et al.*, 2012; Silva *et al.*, 2015; Pellizzaro *et al.*, 2017) ou devido a agentes patogênicos que se tornam mais ativos após a fertilização

orgânica. *Caryocar brasiliense* e *Hancornia speciosa* são espécies que sofrem toxicidade substancial e morrem quando suas sementes entram em contato direto com o fertilizante (Vieira DLM, observação pessoal). Infelizmente, não foi possível avaliar os efeitos da fertilização química e orgânica nas espécies florestais devido à falta de experimentos pareados. Entretanto, estudos mostram que as espécies florestais respondem positivamente à fertilização, aumentando a sobrevivência e acumulando mais biomassa (Rodrigues *et al.*, 2009; Campoe *et al.*, 2014). Nossa análise não avaliou o crescimento e só avaliou a sobrevivência das plântulas após um ano. O crescimento de árvores e arbustos de savana e de floresta estabelecidos pode ser fortemente afetado pela fertilização. As exigências nutricionais das espécies nativas e dos ecossistemas devem ser cuidadosamente estudadas antes de adotar a fertilização.

### **(5) O adubo verde ou as plantas agrícolas facilitam o estabelecimento**

As plantas de cobertura (adubo verde ou agrícola) aumentaram o estabelecimento de espécies nativas de 12% para 17%. As plantas de cobertura reduzem os custos com o controle de plantas daninhas e facilitam o estabelecimento de espécies de árvores (Reis *et al.*, 2019; Vásquez-Castro *et al.*, 2020). As plantas de cobertura de crescimento rápido atuam como pioneiras de vida curta e ajudam no estabelecimento de espécies nativas (Campos-Filho *et al.*, 2013; Vieira *et al.*, 2020). O feijão-guandu (*Cajanus cajan*) foi a planta de cobertura mais comumente usada (87% dos estudos), às vezes associada ao feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), lablab (*Dolichos lablab*) e crotalária (*Crotalaria* spp.). A mamona (*Ricinus communis*) e o milho (*Zea mays*) também foram usados. As plantas de adubação verde ou agrícolas facilitam o estabelecimento de espécies nativas ao (i) sombrear as plantas daninhas e reduzir sua infestação, (ii) atenuar os extremos de temperatura e umidade, (iii) descompactar o solo, (iv) promover o controle da erosão, (v) adicionar matéria orgânica ao solo, (vi) aumentar a disponibilidade de água no solo, (vii) promover a retenção de nutrientes no solo, (viii) fixar nitrogênio e (ix) ser consumidas preferencialmente por formigas, reduzindo assim a herbivoria nas espécies nativas (Campos-Filho *et al.*, 2013; Kumar *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015; Reis *et al.*, 2019; Souza, Engel & Mattos, 2021b).

Esperávamos que o sombreamento proporcionado pelas plantas de cobertura reduzisse ou até mesmo inibisse o estabelecimento de espécies florestais pioneiras e espécies de savana que exigem pleno sol para se estabelecer (Doust *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2015). Isso provavelmente não ocorreu porque a densidade de plantas de cobertura

estabelecida nos experimentos não foi alta. Nós já observamos uma redução na emergência e sobrevivência de árvores em áreas com alta densidade de plantas de cobertura (Ferreira MC, observação pessoal). Nesses casos, elas podem ser desbastadas seletivamente e depositadas no solo. A semeadura direta com plantas de cobertura pode ser feita em duas etapas para aumentar a facilitação (Souza *et al.*, 2021b). No primeiro ano, as sementes de adubo verde, de agrícolas e de espécies nativas de vida curta podem ser semeadas para estabelecer uma vegetação arbustiva baixa. No segundo ano, as plantas de cobertura podem ser removidas por meio de corte ou capina seletiva somente nas faixas em que as linhas ou covas serão abertas para a semeadura direta de espécies nativas de vida longa.

#### **(6) O controle de plantas daninhas após a semeadura direta é essencial**

A capina química ou mecânica aumentou o estabelecimento de 9% para 18%. No Brasil, as plantas daninhas nas áreas de restauração são principalmente espécies de gramínea exótica geneticamente selecionadas para uso em pastagem cultivada. As gramíneas mais comuns são *Urochloa* spp., *Andropogon gayanus*, *Panicum maximum* e *Melinis minutiflora*. Essas gramíneas representam o principal obstáculo à restauração ativa e passiva de florestas, savanas e campos no Brasil (Zenni & Ziller, 2011; Dechoum *et al.*, 2018) devido à sua alta produtividade, formação de banco de sementes e rebrota após corte e queima (Sampaio *et al.*, 2019; Wiederhecker *et al.*, 2024). A capina é eficaz porque mata as plantas daninhas, eliminando a competição acima e abaixo do solo (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020; Piotrowski *et al.*, 2023), enquanto a roçada permite que as gramíneas rebrotem e recuperem a parte aérea rapidamente (Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020). A roçada deve ser aplicada em uma frequência alta para ser eficaz. Por outro lado, a roçada pode ter o efeito oposto, pois as plantas daninhas precisam aumentar a competição por água e nutrientes enquanto recuperam a parte aérea perdida (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a). As espécies pioneiras se beneficiaram da roçada possivelmente porque crescem e escapam rapidamente do sombreamento proporcionado pelas plantas daninhas (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a).

A capina química ou mecânica aumentou o estabelecimento de 22% para 41% nas sementes grandes, 6% para 15% nas plântulas PEF e 19% para 41% nas plântulas FHR. Somente as sementes muito pequenas não apresentaram aumento no estabelecimento devido à capina. As sementes muito pequenas são as mais sensíveis aos filtros abióticos

e bióticos (Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008) e apresentam a variação mais significativa de sucesso na semeadura direta (Ferreira e Vieira, em preparação). No entanto, as plântulas PEF (sem reservas), geralmente com sementes muito pequenas e pequenas, triplicaram seu estabelecimento com o controle de plantas daninhas. Quando livres de competição, as plântulas PEF melhoram seu desempenho porque são fracas competidoras com as plantas daninhas por luz, nutrientes e água (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020). Além disso, as plântulas de sementes maiores, que geralmente são mais tolerantes à competição, se beneficiaram muito com a capina, pois puderam atingir seu máximo vigor e investir no crescimento das raízes e do caule e na produção de folhas (Passaretti *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2023). Plantas maiores e mais nutridas sobrevivem com mais frequência. O efeito maior encontrado nas plântulas FHR pode parecer estranho. No entanto, as plântulas FHR estão fortemente associadas a espécies de savanas e florestas tropicais secas que precisam de pleno sol para sobreviver e crescer (Rizzini, 1965; Ressel *et al.*, 2004; Pujol *et al.*, 2005).

O controle eficaz de plantas daninhas é fundamental para o sucesso da restauração por semeadura direta, começando com a preparação do solo e se estendendo pelas semanas e meses seguintes (Sampaio *et al.*, 2019; Shaw *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2023; Piotrowski *et al.*, 2023). A aplicação direcionada de herbicidas de amplo espectro ou seletivos para o controle de plantas daninhas pode ser mais custo-efetiva do que a capina mecânica (Piotrowski *et al.*, 2023; Hinkson *et al.*, 2024). No entanto, a regulamentação adequada, o manejo integrado de plantas daninhas, o uso de equipamentos de proteção individual apropriados e a adesão a protocolos rigorosos de manuseio e aplicação de herbicidas são essenciais para minimizar a contaminação ambiental e a exposição dos trabalhadores.

### **(7) O dossel ou a cobertura de plantas agrícolas e de adubação verde são benéficos**

Nossas descobertas demonstram que o estabelecimento de plântulas foi favorecido sob o dossel de árvores ou plantas agrícolas e de adubação verde. As áreas preparadas para a semeadura direta geralmente apresentam condições mais estressantes para a emergência e a sobrevivência das plântulas do que em seus ambientes naturais. A dessecação está entre as principais causas de mortalidade de sementes e plântulas. O dossel da floresta secundária ou das plantas de cobertura pode atenuar o estresse microclimático e favorecer o estabelecimento de espécies clímax tolerantes à sombra, espécies de sementes grandes e/ou com alto teor de água. No entanto, as espécies

pioneiras e as espécies de sementes pequenas apresentaram estabelecimento reduzido sob a cobertura do dossel. As plântulas de espécies pioneiras dependem da luz para o desenvolvimento a partir da emergência devido às suas baixas reservas e às exigências de fotossíntese com alta intensidade de luz.

Com base nesses resultados, recomendamos o teste de uma abordagem de semeadura direta em duas etapas. Primeiro, semear as sementes de espécies pioneiras, secundárias e clímax exigentes de luz e com menos de 40% de teor de água. Esse grupo exige ou tolera condições de pleno sol para se desenvolver e é menos sensível às flutuações de umidade e temperatura em áreas abertas (Hooper *et al.*, 2002; Doust *et al.*, 2008; Tunjai & Elliott, 2012). Após o estabelecimento de uma floresta secundária inicial com 50-70% de cobertura de dossel (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Doust *et al.*, 2008; Cole *et al.*, 2011), é hora de enriquecer o local com espécies que exigem ou toleram o sombreamento. Em nosso estudo, as espécies clímax tolerantes à sombra e com sementes que apresentam mais de 40% de teor de água compuseram o grupo para o enriquecimento. Essas espécies são mais sensíveis às flutuações de umidade e temperatura e precisam de sombra para se estabelecer (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Cole *et al.*, 2011). No entanto, é essencial monitorar a área e avaliar a real necessidade de enriquecimento (Vieira *et al.*, 2017, 2021). Esta segunda etapa de semeadura pode ser desnecessária se aves, morcegos ou outros animais dispersarem as sementes de espécies clímax tolerantes à sombra e com sementes úmidas, e elas se estabelecerem e se desenvolverem com sucesso no local de restauração (Holl *et al.*, 2017; Rodrigues *et al.*, 2019).



## **V. Conclusões**

- (1) As técnicas que promoveram o maior sucesso no estabelecimento foram o enterramento de sementes e o controle de plantas daninhas químico ou mecânico, que são benéficos, ou pelo menos neutros, para a maioria dos grupos funcionais de sementes e plântulas. Recomendamos fortemente melhorar a precisão da profundidade de semeadura, seja manualmente ou com ferramentas e máquinas.
- (2) Recomendamos o manejo integrado de plantas daninhas para controlá-las antes e nas primeiras semanas após a semeadura.
- (3) As plantas de cobertura foram eficazes independentemente do grupo funcional, com um tamanho de efeito menor do que o enterramento de sementes e o controle de plantas daninhas. Outras técnicas foram positivas para alguns grupos funcionais e devem ser aplicadas de forma específica.
- (4) A semeadura sob uma floresta secundária é fortemente positiva para as espécies clímax tolerantes à sombra e sementes grandes com alto teor de água.
- (5) Os tratamentos para quebra de dormência foram eficazes apenas para espécies pioneiras.
- (6) No geral, as técnicas de manejo têm o potencial de aumentar quatro vezes o sucesso de estabelecimento de plântulas. Quando combinadas, seu potencial deve aumentar significativamente. Portanto, as técnicas analisadas podem economizar até 75% da quantidade de sementes semeadas, o que constitui o principal custo da restauração por semeadura direta.

## **VI. Informações suplementares - Capítulo 2**

Informações adicionais de suporte podem ser encontradas online na seção de Informações Suplementares ao final do Capítulo.

**Tabela S1.** Planilha Excel com todas as referências da pesquisa (referências).

**Tabela S2.** Planilha Excel com os metadados disponíveis da referência 110 (referência 110).

**Tabela S3.** Planilha Excel com os metadados disponíveis da referência 111 (referência 111).

**Tabela S4.** Planilha Excel com técnicas de manejo controladas pelo estudo.

**Tabela S5.** Planilha Excel com metadados dos traços funcionais.

**Tabela S6.** Planilha Excel com traços funcionais de sementes e plântulas por espécie.

**Tabela S7.** Planilha Excel com referências dos traços funcionais de sementes e plântulas.

**Tabela S8.** Planilha Excel com a metodologia utilizada no Laboratório de Fisiologia de Sementes da Embrapa.

**Tabela S9.** Planilha Excel com os modelos de efeitos mistos lineares ajustados.

**Para download:**

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1Z1XP4QnLHqh4vEU5O5G1XVR6JtK5NVII/edit?usp=sharing&ouid=103524157042346051163&rtpof=true&sd=true>

**CAPÍTULO 3 - Características funcionais das sementes e plântulas que explicam o sucesso de emergência, sobrevivência e estabelecimento na semeadura direta tropical**



*Sterculia striata* A.St.-Hil. & Naudin. As plantas com seu jeitinho sutil, são excelentes professoras das durezas da vida. Escavei esse xixá-do-cerrado para fazer a fotografia. Pela correria da vida, ela ficou esquecida em uma bandeja por 20 longos dias. Quando a reencontrei, nem murchas as folhas estavam; a planta exalava vida. Nessa hora, me senti como um caçador arrependido de ter ceifado a vida de uma campeira preta. Botei a danada entre os dedos e levei até um capão de mata, cavei com as unhas mesmo e carinhosamente a replantei. Quem sabe um dia, ela perdoe esse velho curupira descuidado.

## Resumo

A semeadura direta é um método custo-efetivo para restauração ecológica, mas o estabelecimento de plântulas pode ser baixo e variar amplamente entre espécies. Acreditamos que essa variação resulta de filtros ecológicos que restringem características funcionais menos vantajosas. Conduzimos uma revisão sistemática da literatura sobre experimentos de semeadura direta no Brasil, encontrando 111 estudos que nos permitiram extrair proporções de emergência (plantas emergidas/sementes semeadas), sobrevivência (plantas vivas/plantas emergidas) e estabelecimento (plantas vivas/sementes semeadas) para espécies de árvores, arbustos e palmeiras no primeiro ano após a semeadura. Investigamos como 14 características das sementes e plântulas afetam conjuntamente a emergência, sobrevivência e estabelecimento. Identificamos que sementes maiores, com cotilédones de reserva, vida longa e crescimento lento contrastam com sementes menores, com cotilédones fotossintetizantes, vida curta e crescimento rápido. Sementes com maior teor de água, recalcitrantes, com dormência combinada e zoocóricas contrastam com sementes de maior longevidade, ortodoxas e com dormência física. A emergência foi positivamente relacionada com a massa e longevidade da semente. Cotilédones de reserva promoveram uma emergência 1,5 vezes maior que cotilédones fotossintetizantes. Espécies de savana e floresta seca tiveram uma sobrevivência 1,5 vezes maior que espécies de floresta chuvosa. O estabelecimento foi 2,1 vezes maior nas sementes não dormentes e com dormência física do que nas sementes com dormência endógena e combinada. A variação no estabelecimento das sementes planas foi 44% maior que das sementes redondas. Um eixo de características capturou o espectro de colonização e persistência, enquanto outro capturou o grau de tolerância à alta incidência solar presente nas áreas em início de restauração. Os resultados revelaram as características mais restringidas pelos filtros ecológicos que atuam na semeadura direta. Contudo, podemos manipular os filtros e modificar a montagem das comunidades restauradas. Podemos aumentar o sucesso das sementes pequenas, planas e plântulas com cotilédones fotossintetizantes com precisão no enterramento das sementes, controle eficaz de plantas daninhas e formigas. O sucesso também pode aumentar ao armazenar as sementes sob condições adequadas, considerando os limites naturais de longevidade das espécies e semeando sementes recalcitrantes logo após a coleta. O sucesso de espécies com dormência endógena e combinada pode aumentar ao semear sob condições ambientais propícias para a superação da dormência ou quebrando a dormência com técnicas eficazes

para a condição de campo. O sucesso de espécies de floresta chuvosa pode aumentar em consórcio com plantas de cobertura que amenizam extremos de temperatura e umidade. Essas estratégias podem melhorar significativamente a eficácia da semeadura direta, tornando-a uma opção viável e robusta para a restauração ecológica em larga escala.

**Palavras-chave:** Função dos cotilédones; Filtros ecológicos; Longevidade das sementes; Massa das sementes; Forma das sementes; Estabelecimento de plântulas; Restauração baseada em sementes.

## **Abstract**

Direct seeding is a cost-effective method, but it can result in low percentage and high variation in establishment between species. We believe that variation in species establishment from ecological filters that restrict less advantageous functional traits. We conducted a systematic review of the literature on direct seeding experiments in Brazil. We found 111 studies and extracted the proportions of emergence (plants emerged/seeds sowed), survival (plants alive/plants emerged) and establishment (plants alive/seeds sowed) of tree, shrub and palm species in the first year after direct seeding. We investigated how 14 characteristics of seeds and seedlings together affect emergence, survival and establishment. We found an association between (i) larger seeds, reserve cotyledons, long life and slow growth, as opposed to smaller seeds, photosynthetic cotyledons, short life and fast growth; and (ii) seeds with higher water content, recalcitrant, combined dormancy and zoochoric, as opposed to seeds with greater longevity, orthodox and physical dormancy. Emergence was positively related to seed mass and longevity. Reserve cotyledons promoted emergence 1.5 times more than photosynthetic cotyledons. Savanna and dry forest species survived 1.5 times more than wet forest species. Establishment was 2.1 times higher in nondormancy and physical dormancy seeds than endogenous and combined dormancy seeds. The variation in the establishment of flat seeds was 44% greater than round seeds. One axis of characteristics captured the spectrum of colonization and persistence, while the other captured the degree of tolerance to the high solar incidence present in the areas at the start of restoration. Our results revealed the characteristics most restricted by the ecological filters that affect direct seeding. However, we can manipulate the filters and modify the assembly of the restored communities. The success of small seeds, flat seeds and seedlings with photosynthetic cotyledons can increase with greater precision in burying the seeds, effective weed and ant control. The establishment success can also increase by storing the seeds under suitable conditions, considering the natural longevity limits of the species and sowing recalcitrant seeds immediately after collection. The species success with endogenous and combined dormancy can be increased by sowing under environmental conditions favorable to overcoming dormancy or by dormancy breaking with effective techniques for field conditions. The wet forest species success can increase when they are intercropped with cover plants that mitigate temperature and humidity extremes.

**Keywords:** Cotyledon function; Ecological filters; Seed longevity; Seed mass; Seed shape; Seedling establishment; Seed-based restoration.

## I. Introdução

A regeneração natural assistida é desejável sempre que possível, porém, em ecossistemas com baixa resiliência, torna-se inviável (Holl & Aide, 2011; Crouzeilles *et al.*, 2017). Nestes casos, intervenções ativas são necessárias para iniciar o processo de restauração. O plantio de mudas (Rodrigues *et al.*, 2009) e a semeadura direta (Campos-Filho *et al.*, 2013) são os principais métodos ativos de restauração em escala operacional na região tropical. Esses métodos são usados para enriquecer áreas com médio potencial de regeneração natural ou para estabelecer plantas em área total em locais com baixo ou nenhum potencial de regeneração (Holl & Aide, 2011; Zahawi & Holl, 2014). Porém, diferente do plantio de mudas, a semeadura direta apresenta baixo custo de implementação e manutenção (Raupp *et al.*, 2020), logística simplificada (Shaw *et al.*, 2020), garantindo rápida cobertura do solo (Sampaio *et al.*, 2019) e fechamento do dossel (Freitas *et al.*, 2019).

Embora a semeadura direta alcance bons resultados ecológicos a nível de comunidade (Doust *et al.*, 2006; Campos-Filho *et al.*, 2013; Pellizzaro *et al.*, 2017; Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019) e tenha um baixo custo (Engel & Parrotta, 2001; Sampaio, Holl & Scariot, 2007; Cava *et al.*, 2016; Raupp *et al.*, 2020), ela apresenta alta variabilidade no estabelecimento tanto entre quanto dentro das espécies (Ceccon *et al.*, 2016; Souza & Engel, 2023). Grande parte da variabilidade no sucesso de estabelecimento das espécies decorre de filtros ecológicos que restringem a germinabilidade, a emergência e a sobrevivência inicial das plântulas (Jiménez-Alfaro *et al.*, 2016; Larson & Funk, 2016; Saatkamp *et al.*, 2019). Os filtros abióticos e bióticos restringem as características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas (doravante referidas como características) que são menos vantajosas em cada contexto ambiental (Larson *et al.*, 2015; Jiménez-Alfaro *et al.*, 2016; Larson & Funk, 2016; Saatkamp *et al.*, 2019; Londoño-Lemos, Torres-González & Madriñán, 2024). Por isso, apenas uma parte do conjunto global de espécies semeadas consegue se estabelecer no campo.

Algumas características das sementes e plântulas são mais permeáveis aos filtros ecológicos e desempenham um papel crucial na montagem das comunidades na restauração baseada em sementes (Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017; Souza & Engel, 2018; Rodrigues *et al.*, 2019; Piotrowski *et al.*, 2023). Sementes pequenas e achatadas perdem a capacidade de emergir se enterradas a mais de 1 cm, enquanto



sementes grandes e esféricas podem emergir de até 5 cm de profundidade (Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017). Sementes grandes geram plântulas maiores, que são mais resistentes às condições adversas e à competição com plantas daninhas nas áreas em processo inicial de restauração (Camargo *et al.*, 2002; Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017). Cotilédones de reserva aumentam a sobrevivência no primeiro ano após a semeadura direta (Santos & Buckeridge, 2004; Silva & Vieira, 2017; Pereira *et al.*, 2013a), dando suporte para formação aérea e radicular. Sementes recalcitrantes têm menor sucesso do que as ortodoxas por serem mais suscetíveis à desidratação sob altas temperaturas em áreas abertas ou por serem semeadas mortas em função de sua curta longevidade (Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017; Grossnickle & Ivetić, 2017; Löff *et al.*, 2019). A dormência e embebição lenta espalham os riscos de mortalidade durante a fase de emergência, favorecendo a superação de extremos de temperatura e umidade do solo, a imprevisibilidade no início da estação chuvosa e os veranicos (Vieira *et al.*, 2008; Masarei *et al.*, 2019; Correia *et al.*, 2022; Laumann *et al.*, 2023).

Nesse sentido, realizamos uma revisão sistemática da literatura disponível sobre experimentos de semeadura direta realizados no Brasil para compreender quais características das sementes e plântulas conferem vantagens ou desvantagens na fase inicial de estabelecimento. Com base nisso, propomos estratégias de manejo e agendas de pesquisa para otimizar o sucesso das características mais restringidas. Selecionamos 14 características das sementes e plântulas com base na literatura disponível, consultas a especialistas em tecnologia de sementes e gestores que atuam diretamente na restauração (Tabela 1). Das 14 características, oito estão relacionadas às sementes, cinco às plântulas e uma à zona bioclimática preferencial das espécies. Nosso objetivo foi avaliar (1) a associação entre essas características e (2) como elas, em conjunto, afetam a emergência, sobrevivência e estabelecimento no primeiro ano após a semeadura direta (Tabela 1).

**Tabela 1:** As características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas, unidades de medida, descrição, significado funcional e resposta funcional esperada na regeneração natural e semeadura direta. Referências foram citadas na informação de apoio (Tabela S11).

Característica	Unidade	Descrição	Significado funcional	Resposta funcional
Germinabilidade	%	Variou de 2 a 95% nas espécies estudadas. Variável associada às condições empregadas em laboratório.	Capacidade de colonização, vigor das sementes, viabilidade das sementes, sementes vazias e embriões malformados.	Quanto maior a germinabilidade, maior é (i.) a capacidade de colonização; (ii.) vigor e viabilidade; e menor é o número de (iii.) sementes vazias e embriões malformados.
Massa fresca da semente	mg	Ou propágulo, quando o fruto e a semente são uma unidade inseparável. Testada em escala logarítmica. Variou de 0,34 a 28.105,96 mg nas espécies estudadas.	Capacidade de colonização, persistência no solo, investimento em reprodução, probabilidade de predação, profundidade de enterramento, profundidade na serrapilheira, probabilidade de emergência, probabilidade de sobrevivência, tamanho inicial da plântula e taxa de crescimento relativa.	Espécies com sementes pequenas (i.) investem em maior pressão de propágulos, cada um com menor chance individual de se estabelecer, mas geram uma população de plantas regenerante abundante; e (ii.) podem formar banco de sementes. Quanto menor a semente (iii.) maior a sensibilidade ao enterramento profundo; (iv.) menor

				a probabilidade de emergência e sobrevivência individual; (v.) a plântula gerada é menor; (vi.) compensada pela maior taxa de crescimento relativa. O inverso (i, ii, iii, iv, v e vi) ocorre quanto maior a semente. Sementes (vii.) menores são predadas por pequenos animais, como formigas; sementes (viii.) maiores são predados por grandes animais, como roedores.
Teor de água das sementes	%	As sementes naturalmente dispersas com baixo teor de água (sementes secas) são geralmente ortodoxas. As sementes naturalmente dispersas com um elevado teor de água (sementes úmidas) são geralmente recalcitrantes.	Sobrevivência da semente, longevidade da semente, tolerância a dessecação, época de dispersão e sincronia de produção.	Quanto menor o teor de água da semente no momento da dispersão (i.) maior é sua longevidade natural; (ii.) tolerância a dessecação e (iii.) sobrevivência em condições adversas de umidade e temperatura. Sementes com (iv.) menor conteúdo de água concentram a dispersão no

		Variou de 4 a 78% nas espécies estudadas.		final da estação seca; e têm (v.) requisitos de armazenamento mais simples. Sementes com (vi.) maior teor de água concentram a dispersão durante a estação chuvosa, geralmente com amadurecimento assíncrono; e têm (vii.) requisitos de armazenamento mais complexos.
Forma da semente	Sem dimensão (variância)	Variância do comprimento, largura e espessura da semente, depois de dividir todos os valores pelo comprimento. Variou de 0,00 a 0,31 nas espécies estudadas.	Profundidade de enterramento, profundidade na serrapilheira e persistência no solo.	Quanto maior a variância e mais próximo à forma plana (i.) maior é a sensibilidade ao enterramento profundo, pois elas são adaptadas a emergir de camadas finas ou da superfície do solo; e (ii.) não foram banco de sementes, germinado logo após as primeiras chuvas.

<p>Longevidade natural das sementes</p>	<p>Meses</p>	<p>Tempo em que as sementes mantêm mais que 50% de sua viabilidade inicial, em temperatura ambiente, armazenadas em sacos de papel, barricas de papelão ou recipientes de vidro, protegidas da umidade e de predadores. Essas são às condições de armazenamento empregadas pelas redes de sementes e coletores de sementes. Variável associada às condições empregadas na semeadura direta. Variou de 0 a 72 meses nas espécies estudadas.</p>	<p>Sobrevivência da semente, durabilidade das sementes na ausência dos fatores externos necessários à germinação, tamponamento ambiental e tolerância a dessecação.</p>	<p>Quanto maior a longevidade natural das sementes (i.) maior é a sobrevivência em condições adversas de umidade e temperatura; (ii.) maior é a proteção contra a troca de gases, temperatura, umidade e patógenos com o meio externo; e (iii.) maior é a tolerância à dessecação.</p>
<p>Comportamento de armazenamento das sementes</p>	<p>Catagórico</p>	<p>As sementes (i.) ortodoxas podem ser desidratadas até um teor de água de 5-7% e</p>	<p>Sobrevivência da semente, tolerância à dessecação e longevidade da semente.</p>	<p>Sementes ortodoxas apresentam (i.) maior sobrevivência em condições adversas de umidade e temperatura;</p>

		armazenadas a baixas temperaturas durante três meses ou mais sem perderem a sua viabilidade; as sementes (ii.) recalcitrantes morrem depois de serem desidratadas até um teor de água de 10-12%; as sementes (iii.) intermediárias não morrem depois de serem desidratadas até um teor de água de 10-12%, mas morrem desidratadas até um teor de água de 5-7% e armazenadas a baixas temperaturas. Variável associada às condições empregadas em laboratório.		(ii.) maior tolerância à dessecação; (iii.) são mais longevas; e apresentam (iv.) requisitos de armazenamento mais simples. O inverso (i, ii, iii e iv) é esperado para sementes recalcitrantes. Sementes intermediárias têm uma resposta intermediária entre as ortodoxas e recalcitrantes.
Síndrome de dispersão das sementes	Categórico	Ou propágulo, quando o fruto e a semente são uma unidade inseparável. Anemocóricas são	Capacidade de colonização, sobrevivência da semente, tolerância a dessecação, época	(i.) A distância de alcance na frente de colonização é menor nas sementes autocóricas, um pouco

		<p>dispersas pelo vento, autocóricas se auto dispersam e zoocóricas são dispersas por animais.</p>	<p>de dispersão e sincronia de produção.</p>	<p>maior nas anemocóricas e muito maior nas zoocóricas. (ii.) Manchas de vegetação próxima e indivíduos isolados promovem a colonização das autocóricas e anemocóricas; enquanto as (iii.) zoocóricas dependem de uma maior integridade da paisagem (número de fragmentos, proporção de vegetação nativa e conectividade). Autocóricas e anemocóricas (iv.) são mais tolerantes a dessecação; (v.) apresentam maior sobrevivência em condições adversas de umidade e temperatura; (vi.) concentram a dispersão no final da estação seca; e (vii.) apresentam requisitos de armazenamento mais simples. Sementes (viii.) zoocóricas</p>
--	--	--	--	--

				concentram a dispersão durante a estação chuvosa, geralmente com amadurecimento assíncrono; e têm (ix.) requisitos de armazenamento mais complexos.
Dormência das sementes	Catagórico e quantitativo	Sementes sem dormência (ND), absorvem água e completam a germinação dentro de quatro semanas. Sementes com dormência física (PY), apresentam o tegumento da semente ou endocarpo do fruto impermeável, impedindo trocas gasosas e a absorção de água, requisitos para o crescimento embrionário e a germinação. Dormência endógena consiste na junção das dormências fisiológica, morfológica e	Atraso na germinação, sincronia da germinação, escape de condições ambientais imprevisíveis, tamponamento ambiental, taxa de embebição, persistência no solo, defesa contra predadores/patógenos, resistência a altas temperaturas, durabilidade das sementes e época de dispersão.	Sementes dormentes (i.) atrasam a germinação para períodos com umidade e temperatura favoráveis; (ii.) diluem o risco de morte ao longo do tempo; e (iii.) persistem no solo até que as condições favoráveis se apresentem. Sementes com dormência física (tegumento ou endocarpo espesso) têm (iv.) maior resistência a altas temperaturas; (v.) ao fogo; e estão (vi.) protegidas contra a troca de gases, temperatura, umidade e patógenos com o meio externo, levando a



		<p>morfofisiológica (PD, MD &amp; MPD). Sementes com dormência (i.) fisiológica (PD), absorvem água e possuem embriões completamente desenvolvidos, mas geralmente há inibidores químicos no embrião, impedindo que ele se desenvolva, depende de sinalização ambiental para ser superada; sementes com dormência (ii.) morfológica (MD), absorvem água, mas os embriões não estão totalmente desenvolvidos no momento da dispersão e requerem tempo para crescer antes da germinação; sementes com dormência (iii.) morfofisiológica (MPD),</p>		<p>maior longevidade. Nas espécies dispersas (vii.) na estação seca, predomina as sementes não dormentes ou com dormência física; (viii.) durante a estação chuvosa, a dormência endógena aumenta sua importância; e (ix.) na transição da chuvosa para a seca, as sementes não dormentes praticamente desaparecem.</p>
--	--	--	--	---

		apresentam uma combinação de dormência fisiológica e morfológica. Sementes com dormência combinada (PY+PD), apresentam a combinação da dormência física e fisiológica, ou seja, o revestimento impermeável e embriões fisiologicamente dormentes.		
Exposição do cotilédone	Catégorico	Nas plântulas (i.) fanerocotiledonares, o tegumento da semente (ou endocarpo) se abre e dois cotilédones aparecem; nas plântulas (ii.) criptocotiledonares, os cotilédones permanecem	Proteção de reservas.	Manter a reserva dos cotilédones protegida dentro do revestimento das sementes confere uma grande vantagem frente aos (i.) predadores, (ii.) patógenos, (iii.) eventos de fogo e (iv.) períodos de seca.

		protegidos dentro do tegumento (ou endocarpo) da semente.		
Posição do cotilédone	Catagórico	Nas plântulas com cotilédones (i.) epígeos, o hipocótilo se desenvolve a pelo menos 2 cm acima da superfície do solo; nas plântulas com cotilédones (ii.) hipógeos, o hipocótilo se desenvolve na superfície do solo (é curto nas semi-hipógeas), ou não há hipocótilo, assim apenas o epicótilo se desenvolve no processo de emergência da plântula.	Profundidade de enterramento, profundidade na serrapilheira e tamponamento ambiental.	Plântulas com germinação epígea (i.) têm maior a sensibilidade ao enterramento profundo; mas (ii.) o alongamento do hipocótilo é vantajoso em ambientes com altas temperaturas na superfície do solo, condição que reduz a capacidade fotossintética da planta.
Função dos cotilédones	Catagórico	Cotilédones (i.) fotossintetizantes têm aspecto foliáceo (membranáceo, com espessura fina), também conhecidos como	Profundidade de enterramento, profundidade na serrapilheira, resistência a predação, probabilidade de emergência, probabilidade de sobrevivência,	Plântulas com cotilédones fotossintetizantes têm maior (i.) sensibilidade ao enterramento profundo; (ii.) mortalidade quando parcialmente predadas; (iii.) menor

		<p>paracotilédones e caem à medida que a planta cresce; cotilédones de (ii.) reserva são carnosos (espessos e quebram quando dobrados) e vão reduzindo de tamanho à medida que as reservas são absorvidas. Existem casos especiais em que a clorofila está presente em cotilédones de reserva e eles fazem fotossíntese, no entanto, continuam a ser considerados predominantemente órgãos de reserva.</p>	<p>banco de plântulas, tamanho inicial da plântula e taxa de crescimento relativa.</p>	<p>tamanho inicial; (iv.) compensado pela maior taxa de crescimento relativo. O inverso (i, ii, iii e iv) ocorre nas plântulas com cotilédones de reserva. Plântulas com cotilédones de reserva têm (v.) maior sobrevivência em competição com outras espécies, em locais limitados em nutrientes ou propensos ao fogo; e (vi.) formam banco de plântulas.</p>
<p>Velocidade de crescimento</p>	<p>Catagórico</p>	<p>Plantas com crescimento (i.) muito rápido, dominam a cobertura e biomassa nos primeiros 4 anos; plantas com crescimento (ii.) rápido,</p>	<p>Tolerância às condições adversas e ao sombreamento.</p>	<p>Quanto (i.) mais rápido a planta cresce, maior é sua adaptação a ambientes abertos, limitados em nutrientes e sujeitos a variações de umidade e temperatura; por outro</p>

		<p>dominam a cobertura e biomassa nos primeiros 10 anos; plantas com crescimento (iii.) moderado, dominam a cobertura e biomassa após 10 anos; plantas com crescimento (iv.) lento, dominam a cobertura e biomassa após 20 anos ou mais. Atributo sugerido por especialistas em sementeira direta. A classificação foi feita com base na literatura, e grupos de trabalho com botânicos e ecólogos da restauração ou que conduzem a regeneração natural.</p>		<p>lado; (ii.) são sensíveis ao sombreamento; e a (iii.) competição por água e nutrientes à medida que a fertilidade do ambiente aumenta. O inverso (i e ii) se dá quando mais devagar a planta cresce. Isso não se aplica (iii.) a plantas de savana que crescem lentamente em ambientes abertos e pouco férteis; e (iv.) sujeitos a distúrbios</p>
Tempo de vida	Catagórico (intervalo de anos)	Os intervalos de tempo de duração da vida foram <10, 10 a 20, 20 a 100 ou >100 anos.	Investimento em reprodução, probabilidade de emergência, probabilidade de sobrevivência,	Plantas que vivem pouco tempo (i.) investem em maior pressão de propágulos, cada um com menor

		Atributo sugerido por especialistas em semeadura direta. A classificação foi feita com base na literatura, e grupos de trabalho com botânicos e ecólogos da restauração ou que conduzem a regeneração natural.	tamanho inicial da plântula e taxa de crescimento relativa.	chance individual de se estabelecer, mas geram uma população de plantas regenerante abundante; têm (ii.) menor probabilidade de emergência e sobrevivência individual; (iii.) a plântula gerada é menor; (iv.) compensada pela maior taxa de crescimento relativa.  O inverso (i, ii, iii e iv) ocorre nas plantas que vivem muito tempo.
Zona de vida bioclimática	Catagórico	As espécies foram classificadas de acordo com a zona de vida bioclimática tropical que preferencialmente ocorrem <i>sensu</i> Holdridge 1967. Determinado com base na área de ocorrência ( <a href="https://floradobrasil.jbrj.gov.br">https://floradobrasil.jbrj.gov.br</a>	Tolerância às condições adversas, investimento em reprodução e probabilidade de sobrevivência.	Quanto (i.) menor a precipitação, maior a sazonalidade e frequência de distúrbios, mais as plantas são adaptadas as oscilações de umidade e temperatura presente em ambientes abertos; (ii.) apresentam maior investimento em sobrevivência individual (raízes

		<p>r), número de ocorrências (<a href="https://specieslink.net">https://specieslink.net</a>) e literatura. São elas a floresta tropical chuvosa (TRF), floresta tropical seca (TDF) e savana tropical (TS).</p>		<p>longas, raízes com reservas e banco de gemas subterrâneo); em contrapartida, (iii.) investem menos na produção de sementes e pressão de propágulos. Neste sentido, (iv.) no extremo do investimento em sobrevivência individual, se posicionam as plantas de savana; e (v.) no extremo do investimento individual em reprodução por sementes, se posicionam as plantas de florestas tropical chuvosa; (vi.) a floresta tropical seca se posiciona entre a savana e a floresta tropical chuvosa.</p>
--	--	---	--	--

## II. Material e métodos

### (1) Busca e seleção dos estudos

Utilizamos os mecanismos de busca das bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* e a combinação dos termos “*direct seeding*” ou “*direct sowing*” e “*restoration*” e “*Brazil*”, (também em português: “semeadura direta” e “plantio mecanizado” e “restauração” e “Brasil”), para encontrar estudos de semeadura direta em área total ou de enriquecimento feitos no Brasil. Esta busca foi realizada em janeiro de 2022 e incluiu todos os estudos até dezembro de 2021. Foram incluídos artigos revisados por pares em inglês ou português, capítulos de livro, teses de doutorado, dissertações de mestrado, e trabalhos de conclusão de curso. Incluímos a literatura cinza por ela (i) trazer os estudos em português que muitas vezes não são submetidos para publicação em revistas científicas e (ii) para evitar o viés de amostragem na direção apenas de resultados positivos.

Encontramos 87 estudos, sendo a publicação mais antiga datada de 1995. Buscamos nas 87 referências estudos não encontrados pelos termos de busca, e assim encontramos mais 13 estudos, totalizando 100 estudos. Incluímos dois estudos do nosso grupo de pesquisa que ainda não foram publicados. Fizemos a mesma busca sem restringir o país, e encontramos mais nove estudos feitos na região neotropical com espécies que também ocorrem no Brasil. Essa busca complementar foi importante para incluir espécies e aumentar o número de observações de espécies que ocorrem na Amazônia brasileira. Ao final, chegamos a um total de 111 estudos (Tabela S1), sendo 64 artigos revisados por pares, 29 dissertações de mestrado (três dissertações tinham dois experimentos diferentes e cada experimento independente foi considerado um estudo), seis trabalhos de conclusão de curso, seis teses de doutorado, um capítulo de livro e dois experimentos com dados não publicados. A descrição dos métodos e metadados dos experimentos não publicados foram disponibilizados na íntegra (Tabela S2, S3). Quando havia um artigo publicado consequente de uma dissertação ou tese, utilizamos o artigo e citamos a dissertação ou tese como referência adicional (Tabela S1).

Para a análise, incluímos estudos localizados no Brasil (total 323 espécies) ou com espécies que ocorrem no Brasil e que foram semeadas em outros países neotropicais (21 espécies), totalizando 333 espécies, pois 11 sobrepunham-se nas duas listas. Consideramos apenas espécies de árvore, arbusto e palmeira. As ervas foram desconsideradas por serem computadas apenas como cobertura do solo, o que impede o



cálculo de emergência e estabelecimento. Não incluímos árvores e arbustos exóticos ou cultivares agrícolas que geralmente são semeados junto com as nativas. Não incluímos espécies que apresentaram simultaneamente zero por cento de germinabilidade em laboratório ou viveiro (teste de viabilidade) e zero de emergência e estabelecimento no campo, pois as sementes não apresentavam viabilidade. Os estudos considerados em nossa análise precisavam relatar a emergência, estabelecimento, ou ambos, por espécie. Foram feitas consultas por e-mail aos autores de três estudos que apresentavam informações faltantes ou conflitantes, os quais forneceram as informações necessárias.

## **(2) Extração e curadoria dos dados**

Extraímos dos estudos o nome das espécies (atualizado conforme Flora e Funga do Brasil 2023; <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>), a germinação do lote em laboratório ou viveiro (controle de viabilidade), a emergência em campo (número total de plantas emergidas/número de sementes semeadas  $\times$  100) e o estabelecimento em campo (número de plantas vivas no tempo T  $\div$  número de sementes semeadas  $\times$  100). Os tempos em que o estabelecimento foi verificado foram 3, 6, 12, 18, 24 e 36 meses após a semeadura. Os estudos traziam emergência ou estabelecimento ou ambos, sendo que a maioria apresentava a emergência e o estabelecimento aos 6 e/ou 12 e/ou 24 meses. Essas informações foram extraídas dos textos, tabelas, figuras ou arquivos suplementares. Quando necessário, utilizamos o WebPlotDigitizer 4.6 (<https://apps.automeris.io/wpd/>) para extrair informações das figuras com maior precisão. Também anotamos os tratamentos específicos testados para cada espécie em cada estudo (observação).

## **(3) Preparação das variáveis resposta**

Os 12 primeiros meses após a semeadura são os mais críticos para os estabelecimentos das plântulas (Capítulo 1). Por isso, trabalhamos apenas com dados de emergência no primeiro ano, sobrevivência ao final do primeiro ano (estabelecimento aos 12 meses/emergência  $\times$  100) e estabelecimento ao final do primeiro. Eliminamos todas as espécies com menos de três observações, uma vez que três é o número mínimo para o cálculo da média e do desvio padrão (dois graus de liberdade). Então, calculamos a média e o coeficiente de variação (desvio padrão/média  $\times$  100; doravante variação) da emergência, sobrevivência e estabelecimento aos 12 meses para cada espécie. Geralmente, apenas a média é utilizada para esse tipo de avaliação, contudo, entendemos que é importante avaliar um parâmetro de dispersão. Por isso, 192 das 333 espécies foram mantidas para analisar a emergência (Tabela S4), 110 espécies foram mantidas para

analisar a sobrevivência (Tabela S5), e 170 espécies foram mantidas para analisar o estabelecimento (Tabela S6). Menos estudos computaram simultaneamente emergência e o estabelecimento aos 12 meses, resultando em um número menor de dados para a sobrevivência.

#### **(4) Preparação das variáveis preditoras**

As características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas (doravante denominadas características) selecionadas para explicar a emergência, sobrevivência e estabelecimento foram selecionadas com base na literatura (Doust *et al.*, 2006, 2008; Tunjai & Elliott, 2012; Jiménez-Alfaro *et al.*, 2016; Silva & Vieira, 2017; Souza & Engel, 2018; Kildisheva *et al.*, 2020; Passaretti *et al.*, 2020; Piotrowski *et al.*, 2023). Algumas características foram sugeridas por especialistas em tecnologia de sementes nativas e por aqueles que executam a semeadura direta. Essas características foram pesquisadas na literatura (Tabela S7, S8, S9). Utilizamos os mecanismos de busca das bases de dados *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar* e os termos de busca foram as características, o nome da espécie e todos os seus sinônimos botânicos. Para as espécies com informações faltantes, foram adquiridas sementes junto a Rede de Sementes do Cerrado/Associação Cerrado de Pé, Verde Novo Sementes Nativas, Rede de Sementes do Xingu, Rede de Sementes Portal da Amazônia e Rede de Sementes do Vale do Ribeira (compradas ou doadas). Depois mensuramos as características no Laboratório de Fisiologia de Sementes da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília, DF (Tabela S10).

As características analisadas foram: (1) germinabilidade, (2) massa fresca da semente; (3) teor de água das sementes; (4) forma da semente; (5) longevidade natural das sementes; (6) comportamento de armazenamento das sementes (ortodoxo, intermediário e recalcitrante); (7) síndrome de dispersão (anemocórica, autocórica e zoocórica); (8) dormência das sementes (sem dormência, dormência física, dormência endógena e dormência combinada); (9) exposição do cotilédone (fanerocotiledonar ou criptocotiledonar); (10) posição do cotilédone (epígeo ou hipógeo); (11) função do cotilédone (fotossintetizante ou reserva); (12) velocidade de crescimento (muito rápido, rápido, moderado e lento); (13) tempo de vida (<10, 10 a 20, 20 a 100 ou >100 anos); e a (14) zona de vida bioclimática principal de ocorrência da espécie (floresta tropical chuvosa, floresta tropical seca e savana tropical (ver detalhes na Tabela 1).

## **(5) Análise dos dados**

Avaliamos a associação entre as variáveis preditoras contínuas e categóricas simultaneamente utilizando Análise Fatorial de Dados Mistos (FAMD) com os pacotes *FactoMineR* e *factoextra*. A FAMD combina a Análise de Componentes Principais (PCA, para dados contínuos) e Análise de Correspondência Múltipla (MCA, para dados categóricos). Fizemos uma correlação de Pearson entre a média da emergência e a variação da emergência, a média da sobrevivência e a variação da sobrevivência, e média do estabelecimento e a variação estabelecimento, para avaliar o grau de associação entre a estimativa de tendência central e a estimativa de dispersão. Avaliamos a relação entre a emergência, sobrevivência e estabelecimento (média e variação) com as 14 variáveis preditoras usando modelos lineares ou modelos lineares generalizados. Começamos com um modelo cheio contendo as 14 variáveis preditoras e fizemos uma seleção de modelos passo a passo para trás (*Backward stepwise selection*). A cada rodada, retiramos a variável não significativa que menos contribuía para o modelo e a significância foi aferida com a função “Drop1” no pacote *Lmtest*. Apenas as variáveis com contribuição significativa para o modelo foram retidas. Extraímos os tamanhos dos efeitos com o pacote *lsmeans*. O tamanho do efeito representa a contribuição adicional de cada característica sobre a variável resposta. Calculamos a porcentagem relativa de explicação de cada variável preditora. Transformamos a variável resposta ( $\log y+1$ ) para garantir a homogeneidade e normalidade dos resíduos nos modelos de estabelecimento. Um dos modelos de sobrevivência teve melhor ajuste com a distribuição de probabilidades contínua Gamma ( $y+1$ ), com a variabilidade observada ficando dentro da esperada. Os demais modelos apresentaram resíduos homogêneos e normalmente distribuídos, premissas da distribuição Gaussiana. Os efeitos extraídos na escala logarítmica foram transformados para a escala natural. Realizamos todas as análises no programa R (R Core Team, 2024).

## **III. Resultados**

### **(1) Associação entre as características das sementes e plântulas**

Os quadrantes da esquerda retiveram as características mais ligadas à colonização, enquanto os quadrantes da direita retiveram as características mais ligadas à persistência (Figura 1AB). No quadrante superior direito foram posicionadas as sementes maiores (Figura 1A), associado a sementes não dormentes, plantas com cotilédones de reserva, vida longa, crescimento mais lento e espécies savânicas (Figura 1B). Em oposição, no

quadrante inferior esquerdo, foram posicionadas as sementes menores (Figura 1 A), autocóricas, com cotilédones fotossintetizantes, vida curta e crescimento mais rápido (Figura 1B). Esses quadrantes opostos capturaram parte considerável do espectro econômico aquisitivo-conservativo (esquerda inferior-direita superior, Figura 1 AB), relacionado especialmente à capacidade de colonização, profundidade de enterramento, probabilidade de emergência, probabilidade de sobrevivência, tamanho inicial da plântula, taxa de crescimento relativa e duração da vida (Figura 2, Tabela 1).

No quadrante inferior direito foram posicionadas as sementes mais espessas e mais próximas da forma redonda (Figura 1A), associado a plântulas hipógeas e criptocotiledonares (Figura 1 B). Em oposição, no quadrante superior esquerdo, foram posicionadas as sementes menos espessas (Figura 1A), associado a plântulas epígeas e fanerocotiledonares (Figura 1B). As sementes achatadas também foram posicionadas no quadrante superior esquerdo (maiores valores de forma da semente, Figura 1 A), associado a sementes anemocóricas (Figura 1B). No quadrante inferior direito também foram posicionadas as sementes com maior teor de água (Figura 1A), associadas a sementes recalcitrantes, dormência combinada, zoocóricas e espécies de floresta tropical chuvosa (Figura 1B). Em oposição, no quadrante superior esquerdo, foram posicionadas as sementes com menor teor de água e maior longevidade (Figura 1 A), associadas a sementes ortodoxas, com dormência física e espécies de floresta tropical seca (Figura 1 B). Esses quadrantes opostos também capturaram parte considerável do espectro econômico aquisitivo-conservativo (esquerda superior-direita inferior, Figura 1 AB), especialmente relacionado à capacidade de colonização, profundidade de enterramento, proteção de reservas, sobrevivência da semente, durabilidade das sementes na ausência dos fatores externos necessários à germinação, tamponamento ambiental e tolerância à dessecação (Figura 2, Tabela 1).

## **(2) Características das sementes e plântulas que explicam a emergência**

Oitenta e seis por cento da variabilidade explicada da emergência foi atribuída à massa da semente (49%), à longevidade da semente (22%) e à função cotiledonar da plântula (15%). O restante da variabilidade foi explicado pela dormência da semente e velocidade de crescimento da planta (Tabela S12). A emergência foi positivamente relacionada com a massa e a longevidade da semente (Figura 3A). A emergência foi 2,4 vezes maior para sementes não dormentes em comparação com sementes que apresentavam dormência combinada (Figura 3A). A emergência foi 1,5 vezes maior em

plântulas com cotilédones de reserva em comparação com aquelas que tinham cotilédones fotossintetizantes (Figura 3A). A emergência foi 1,7 vezes maior em plantas com crescimento muito rápido e rápido do que em plantas com crescimento moderado e lento (Figura 3A). A variação da emergência (coeficiente de variação) foi negativamente correlacionada com a média da emergência (moderada correlação,  $r = -0,55$ ,  $p < 0,0001$ ). A variação da emergência foi negativamente relacionada com a longevidade da semente e foi 1,3 vezes maior em plântulas com cotilédones fotossintetizantes (Tabela S12, Figura 4A).

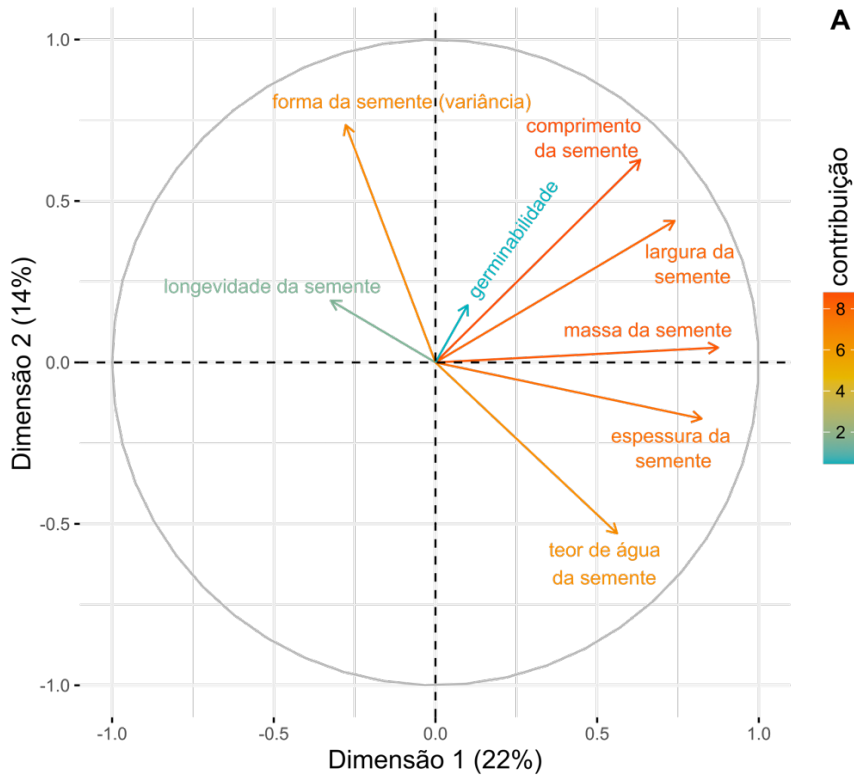
### **(3) Características das sementes e plântulas que explicam a sobrevivência**

Apenas a massa da semente (76% da variabilidade explicada) e a zona de vida explicaram a sobrevivência (Tabela S12). A sobrevivência foi positivamente relacionada com a massa da semente e foi 1,5 vezes maior em plantas de savana e floresta tropical seca em comparação com plantas de floresta tropical chuvosa (Figura 3B). A variação da sobrevivência foi negativamente correlacionada com a média da sobrevivência (forte correlação,  $r = -0,79$ ,  $p < 0,0001$ ). A variação da sobrevivência foi negativamente relacionada com a massa da semente e foi 1,8 vezes maior em plantas de floresta chuvosa (Tabela S12, Figura 4B).

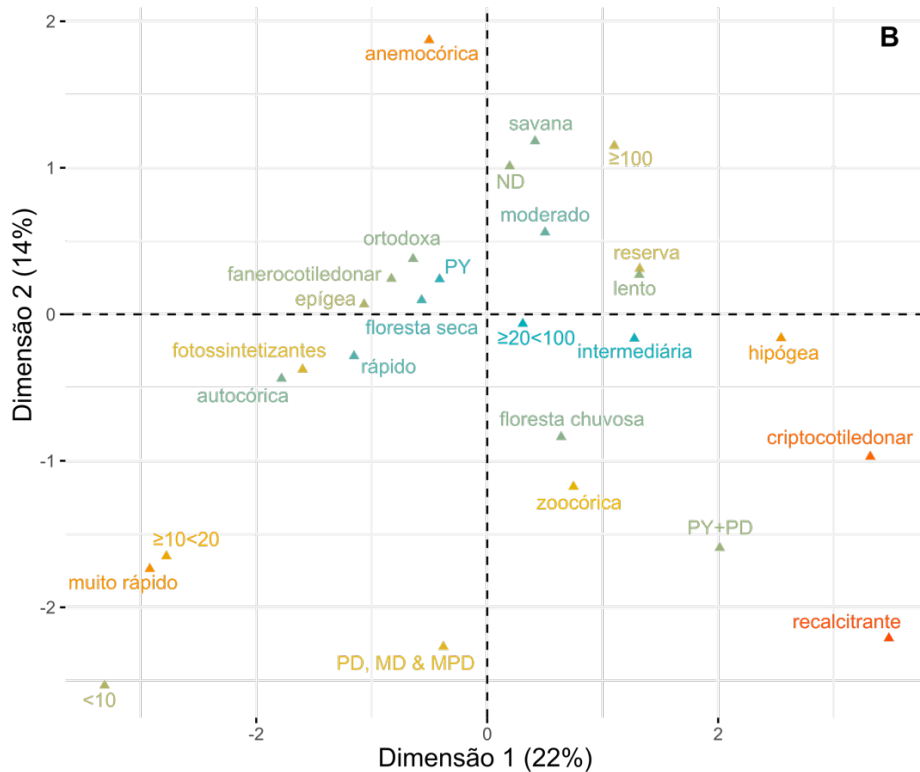
### **(4) Características das sementes e plântulas que explicam o estabelecimento**

Setenta e um por cento da variabilidade explicada do estabelecimento veio da massa da semente, 24% da longevidade da semente e o restante da dormência (Tabela S12). O estabelecimento foi positivamente relacionado com a massa e longevidade da semente (Figura 3C). O estabelecimento foi 2,1 vezes maior em sementes não dormentes e com dormência física do que em sementes com dormência endógena e combinada (Figura 3C). A variação do estabelecimento foi negativamente correlacionada com a média do estabelecimento (moderada correlação,  $r = -0,56$ ,  $p < 0,0001$ ). A massa (54% da variabilidade explicada), a forma (20%), a dormência (14%) e a síndrome de dispersão (12%) explicaram a variação do estabelecimento (Tabela S12). A variação do estabelecimento foi negativamente relacionada com a massa e positivamente relacionada com a forma da semente (sementes planas têm maior variação, Figura 4C). A variação do estabelecimento foi 1,6 vezes maior nas sementes com dormência combinada do que nas sementes com dormência física e não dormentes (Figura 4C). A variação do estabelecimento foi 1,5 vezes maior nas sementes anemocóricas e zoocóricas (Figura 4C).

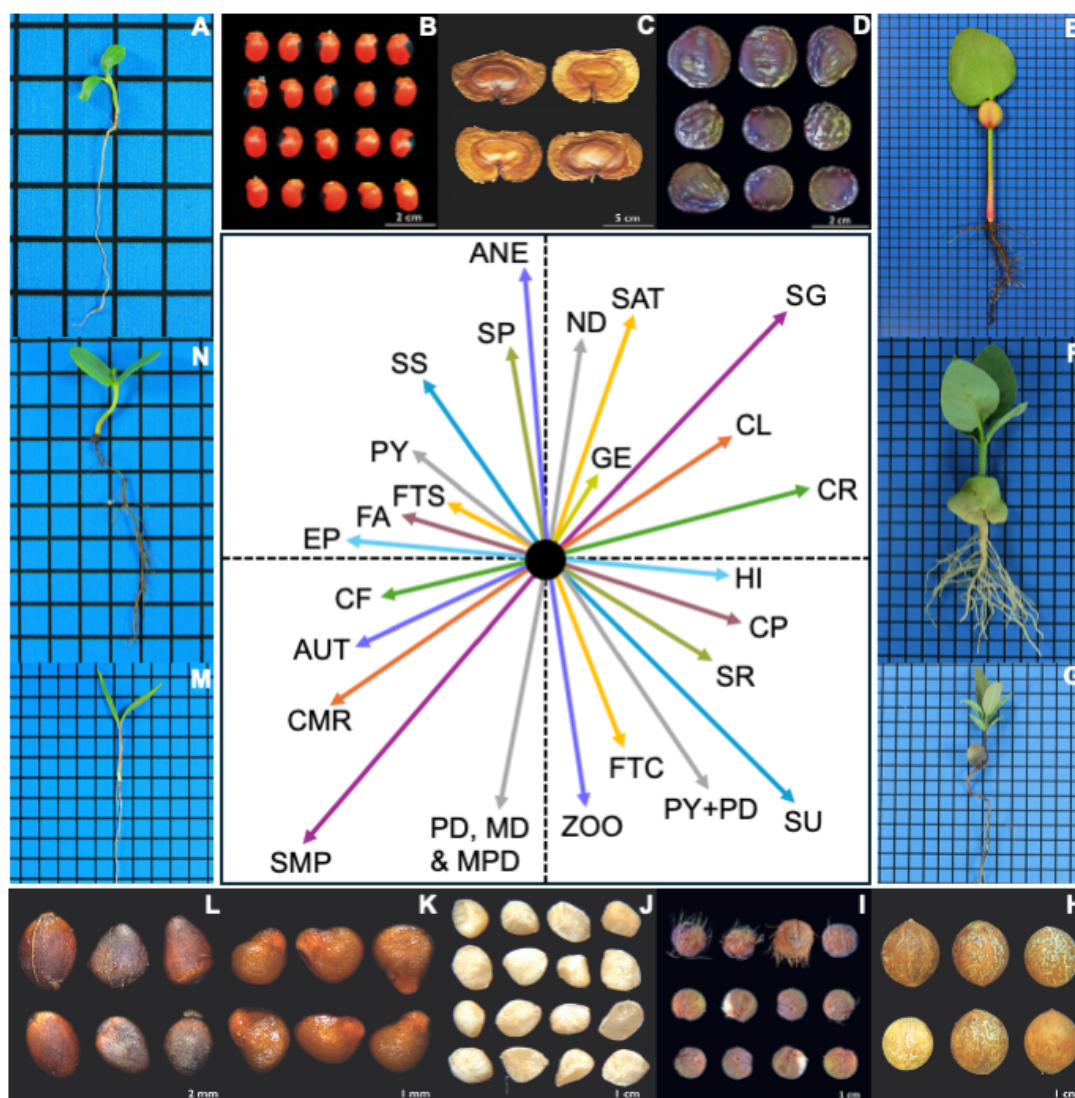
Variáveis contínuas (similar à PCA) - Análise Fatorial de Dados Mistos



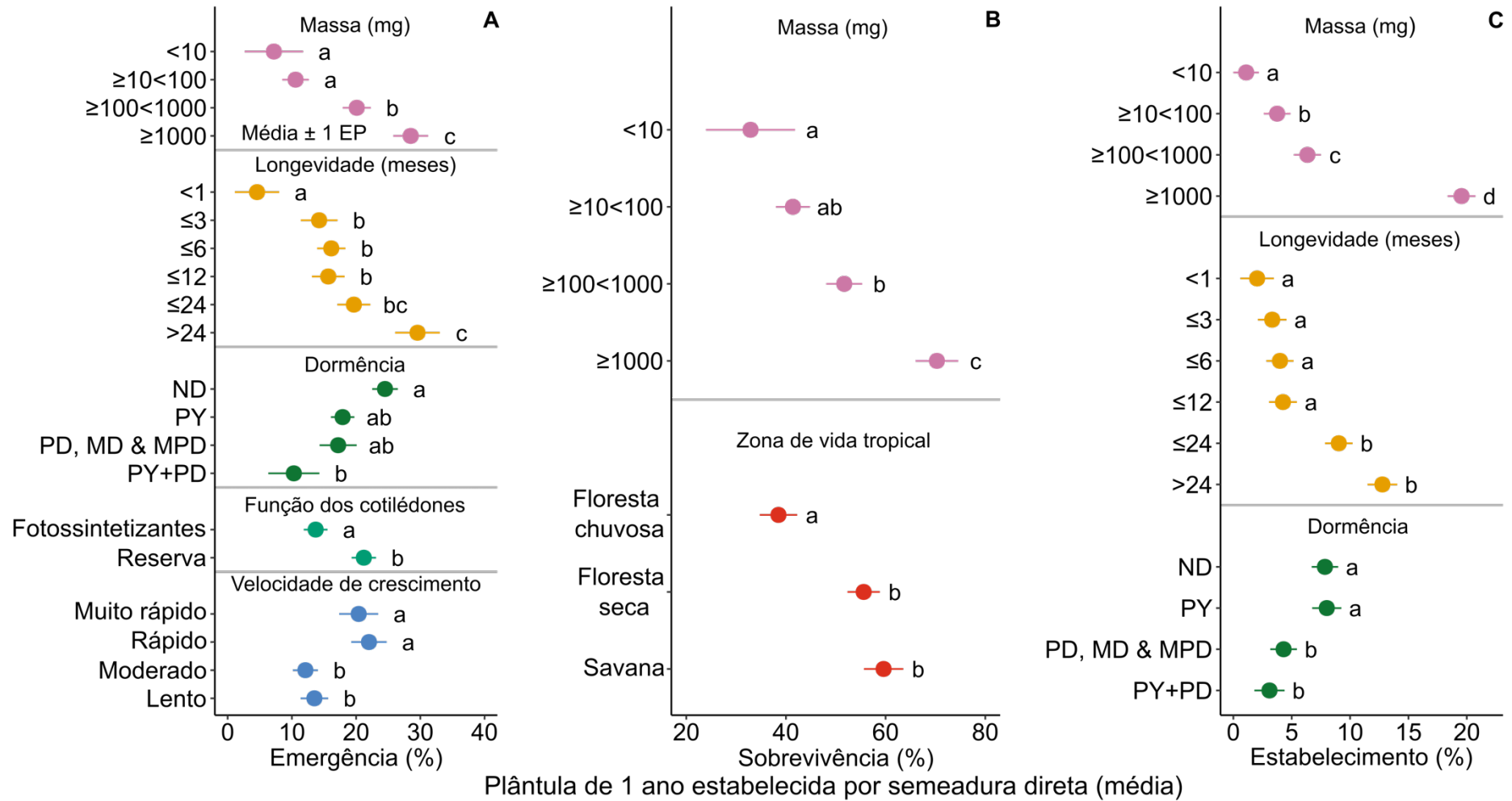
Variáveis categóricas (similar à MCA) - Análise Fatorial de Dados Mistos



**Figura 1:** Associação entre as 14 características funcionais ou da história de vida das sementes e plântulas pela Análise Fatorial de Dados Mistos (características detalhadas na Tabela 1). (A) Dimensionamento contínuo. (B) Dimensionamento categórico. O dimensionamento contínuo e categórico não foi sobreposto para não afetar a visualização e interpretação, já que ocupam escalas distintas no espaço multidimensional. Características avaliadas em 210 espécies (Tabelas S4, S5, S6).

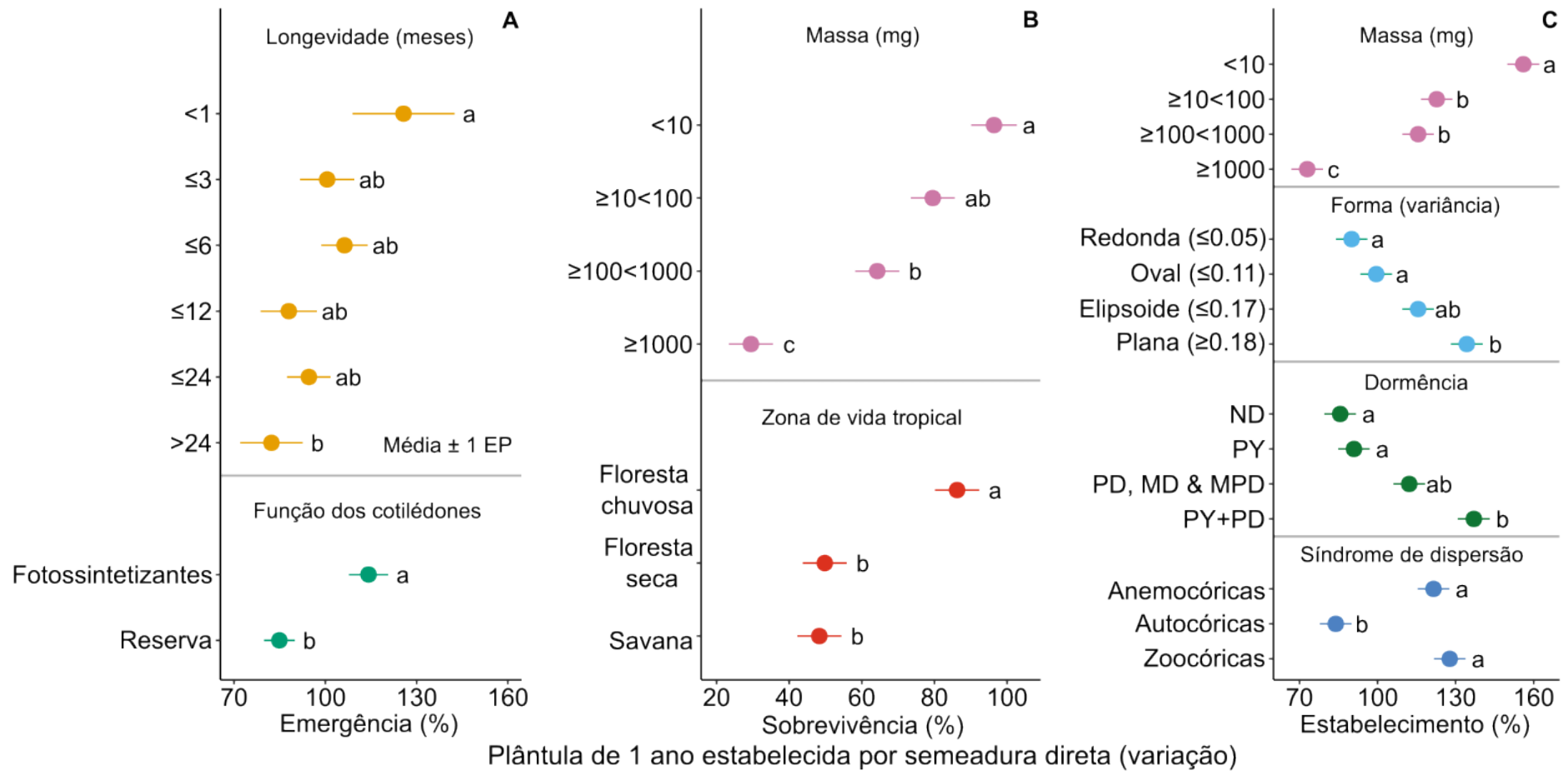


**Figura 2:** Espécies e associações entre as características funcionais. A, *Guazuma ulmifolia*; B, *Ormosia arborea*; C, *Magonia pubescens*; D e E, *Hymenaea stigonocarpa*; F, *Aspidosperma macrocarpon*; G, *Eugenia dysenterica*; H, *Calophyllum brasiliense*; I, *Euterpe edulis*; J, *Genipa americana*; K, *Solanum paniculatum*; L, *Apeiba tibourbou*; M, *Solanum lycocarpum*; N, *Senna alata*. GE, germinabilidade; SG, sementes grandes; SMP, sementes muito pequenas; SU, sementes úmidas e de curta longevidade; SS, sementes secas e de longa longevidade; SR, sementes redondas; SP, sementes planas; ZOO, dispersão zoocórica; AUT, dispersão autocórica; ANE, dispersão anemocórica; ND, não dormente; PY, dormência física; PD, MD e MPD, dormência fisiológica, morfológica e morfofisiológica (endógena); PY+PD, dormência combinada; CP, plântula criptocotiledonar; FA, plântula fanerocotiledonar; HI, plântula hipógea; EP, plântula epígea; CR, cotilédones de reserva; CF, cotilédones fotossintetizantes; CL, crescimento lento e vida longa; CMR, crescimento muito rápido e vida curta; SAT, savana tropical; FTS, floresta tropical seca; FTC, floresta tropical chuvosa. Os painéis de fundo preto foram generosamente cedidos pelo botânico Marcelo Kuhlmann. Os quadrados nos painéis azuis têm 1 x 1 cm.



**Figura 3:** Efeito de cada característica funcional ou da história de vida das sementes e plântulas. (A) Média da emergência. (B) Média da sobrevivência. (C) Média do estabelecimento. A massa e longevidade das sementes foram categorizadas a posteriori para facilitar a visualização.





**Figura 4:** Efeito de cada característica funcional ou da história de vida das sementes e plântulas. (A) Variação da emergência. (B) Variação da sobrevivência. (C) Variação do estabelecimento. A massa, longevidade e forma das sementes foram categorizadas a posteriori para facilitar a visualização.

#### **IV. Discussão**

Esta é a revisão sistemática mais extensa sobre semeadura direta realizada no Brasil e no mundo, na qual analisamos a associação entre características de sementes e plântulas e como elas afetam a emergência, sobrevivência e estabelecimento ao longo de um ano para 210 espécies. Encontramos dois principais eixos de características distribuídos ao longo do espectro econômico aquisitivo-conservativo. No primeiro eixo, foram posicionadas, de um lado, as sementes maiores, associadas com plantas com cotilédones de reserva, vida longa e crescimento mais lento, e, do outro lado, as sementes menores, com cotilédones fotossintetizantes, vida curta e crescimento mais rápido. No segundo eixo, foram posicionadas, de um lado, as sementes com maior teor de água, associadas a sementes recalcitrantes, com dormência combinada e zoocóricas, e, do outro lado, as sementes com menor teor de água e maior longevidade, ortodoxas e com dormência física. Assim, houve separação evidente entre as características associadas à persistência no ecossistema, de um lado, e as características ligadas à colonização de ambientes em processo inicial de regeneração do outro lado.

O sucesso da emergência aumentou principalmente com a massa das sementes, a longevidade natural das sementes e presença de reservas cotiledonares nas plântulas. Essas características fornecem suporte inicial para as plântulas emergirem e resistirem às condições adversas das áreas em início de regeneração. O sucesso da sobrevivência também aumentou com a massa das sementes, no entanto, a zona de vida bioclimática de ocorrência principal das espécies desempenhou um importante papel para completar a explicação. Sementes maiores geram plântulas maiores e mais resistentes à adversidade ambiental e à competição. Além disso, plantas de ambientes mais duros, como as savanas, apresentam adaptações evolutivas que conferem maior sobrevivência em condições ambientais adversas, uma característica comum em áreas em início de restauração. Por fim, as principais características que explicaram o sucesso de estabelecimento foram as mesmas que explicaram o sucesso de emergência. Já foi demonstrado que estabelecimento de plântulas apresenta forte relação com a emergência (análise para 333 espécies; Ferreira and Vieira, submetido, ver Capítulo 1). Contudo, a dormência e a forma das sementes também foram importantes para explicar o sucesso de estabelecimento. Sementes com dormência endógena e combinada e sementes planas tiveram menor sucesso de estabelecimento. A dormência endógena e combinada pode impor dificuldades para o estabelecimento das espécies se os requisitos para sua superação não forem

garantidos antes e após a semeadura direta. Por outro lado, as sementes planas sofrem muito com enterramento profundo, o que pode explicar a maior variabilidade no seu estabelecimento.

### **(1) A massa da semente foi a característica mais importante para montagem da comunidade**

A massa da semente explicou 49% da variabilidade na emergência, 76% na sobrevivência e 71% no estabelecimento. Observamos que a massa da semente foi associada à função do cotilédone, velocidade de crescimento e tempo de vida, corroborando o que outros estudos apontaram (Moles & Westoby, 2004; Grime, 2006; Moles & Leishman, 2008). Como esperado, a emergência, sobrevivência e estabelecimento foram positivamente relacionados com a massa da semente, enquanto a variação da sobrevivência e estabelecimento foram negativamente relacionados com ela. Assim, podemos esperar menor sucesso e previsibilidade no estabelecimento nas sementes muito pequenas e pequenas. Contudo, isso pode ser compensado aumentando a densidade de semeadura à medida que a massa da semente diminui, já que espécies com sementes menores produzem maior quantidade de sementes por indivíduo e por hectare por ano (Moles & Westoby, 2004; Moles & Leishman, 2008). Além disso, elas têm população abundante e alta pressão de propágulos (Dalling, Hubbell & Silvera, 1998), que compensa a menor chance de cada semente se estabelecer (Moles & Westoby, 2004).

Sementes pequenas são comuns em espécies colonizadoras (Whitmore, 1989; Hewitt, 1998; Coomes & Grubb, 2003) e germinam sob umidade estável e alta incidência de luz e temperatura (Dalling *et al.*, 1998; Moles & Leishman, 2008). Porém, sua emergência é fortemente inibida abaixo da serapilheira ou em profundidades maiores do solo (Vazquez-Yanes *et al.*, 1990; Guzman-Grajales & Walker, 1991; Jurado & Westoby, 1992; Metcalfe & Grubb, 1997). O enterramento profundo (> 1 cm) ou irregular afeta muito o estabelecimento das sementes pequenas, especialmente com menos de 10 mg (Jurado & Westoby, 1992; Bond *et al.*, 1999). O enterramento profundo provavelmente foi a principal causa para o baixo estabelecimento (1%) e alta variação do estabelecimento (156%) das sementes com menos de 10 mg. Sementes muito pequenas emergem melhor quando semeadas na superfície ou sob uma fina camada de terra, o que evita predadores e condições ambientais adversas (Jurado & Westoby, 1992; Woods & Elliott, 2004). O enterramento raso para sementes muito pequenas deve ser feito com uma camada de solo

de até duas vezes a espessura da semente, nunca ultrapassando 0,5 cm (Jurado & Westoby 1992; Bond et al. 1999; Doust et al. 2006).

Plântulas geradas por sementes pequenas crescem relativamente mais rápido, o que compensa a baixa altura e o menor desenvolvimento radicular inicial (Kitajima, 2003; Paz & Martínez-Ramos, 2003; Rose & Poorter, 2003; Larson & Funk, 2016). Contudo, para crescer e sobreviver elas precisam estar livres da competição com plantas daninhas (i.e., especialmente gramíneas invasoras e ruderais agressivas), que promovem forte sombreamento e alta competição por nutrientes e água em áreas em início de restauração (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020). Além disso, elas têm menor capacidade de rebrota após serem parcialmente predadas (Harms & Dalling, 1997; Rose & Poorter, 2003). Controlar completamente as plantas daninhas e predadores, como as formigas, nas primeiras semanas e meses após a semeadura direta pode aumentar a sobrevivência de espécies com sementes muito pequenas e pequenas.

A peletização é uma tecnologia emergente que pode aumentar o estabelecimento das espécies com sementes muito pequenas e pequenas. Esse método reveste as sementes com uma camada protetora e permite adicionar repelentes, formicidas, enraizadores, nutrientes e inóculos de fungos e bactérias (Williams *et al.*, 2016; Madsen *et al.*, 2016b; Pedrini *et al.*, 2020a; Taylor *et al.*, 2020). Esses aditivos podem melhorar a emergência, o crescimento inicial, a capacidade competitiva e reduzir a predação das sementes. A peletização também permite aumentar e padronizar o tamanho das sementes, possibilitando um maior controle na profundidade de enterramento e melhor adaptação da semente na boca de saída dos maquinários usados na semeadura direta (Madsen *et al.*, 2016b; Pedrini *et al.*, 2020a). Avaliar a eficácia e o custo-efetividade da peletização das sementes muito pequenas e pequenas é um campo de pesquisa que precisa ser encarado e pode aumentar o sucesso global da semeadura direta.

Sementes médias e, especialmente, as grandes tiveram maior sucesso de estabelecimento, como apontado por outros estudos (Palma & Laurance, 2015; Ceccon *et al.*, 2016; Souza & Engel, 2018). Elas possuem maiores reservas na semente e na plântula gerada para emergir e sobreviver (Leishman *et al.*, 2000; Moles & Westoby, 2004). Elas são mais resistentes à dessecação e à predação, inclusive suas plântulas rebrotam mais facilmente após a predação parcial (Metcalfé & Grubb, 1997; Dalling & Harms, 1999; Green & Juniper, 2004; Baraloto, Forget & Goldberg, 2005). Elas têm mais sucesso, mesmo sob intensa competição com plantas daninhas presente em áreas de restauração. Especialmente porque suas plântulas (i) podem alcançar altura de escape do

sombreamento e (ii) produzir raízes maiores que atingem camadas profundas do solo e com menor incidência de raízes das plantas daninhas (Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020; Ferreira *et al.*, 2023), acessando água e nutrientes. Ademais, o mesmo manejo que favorece as plântulas de sementes pequenas, aumenta ainda mais o sucesso das plântulas de sementes grandes (Doust *et al.*, 2006; Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020).

Sementes maiores são muito beneficiadas pelo enterramento, ficando protegidas de predadores e de oscilações de umidade e temperatura (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006). Elas suportam profundidades maiores (*ca.* 2 cm, até 3 cm para as sementes grandes) sem terem a emergência prejudicada (Doust *et al.* 2006; Bond *et al.* 1999). Porém, profundidades maiores que 5 cm prejudicam e até inviabilizam sua emergência (Bond *et al.*, 1999; Doust *et al.*, 2006; Shaw *et al.*, 2020). As sementes maiores geram plântulas com altura maior e raízes mais desenvolvidas, mas que crescem lentamente e vivem mais tempo (Leishman *et al.*, 2000; Larson & Funk, 2016). Logo, garantir seu estabelecimento é essencial para atingir o sucesso da restauração no longo prazo.

## **(2) O estabelecimento de plântulas foi positivamente relacionado com a longevidade das sementes**

A longevidade das sementes foi responsável por 22% e 24% da variabilidade explicada da emergência e estabelecimento, respectivamente. Observamos que a longevidade das sementes foi associada ao menor teor de água, sementes ortodoxas, com dormência física e espécies de floresta tropical seca, que estava em oposição as sementes com maior teor de água, recalcitrantes e espécies de floresta tropical chuvosa. A emergência e o estabelecimento foram positivamente relacionados com a longevidade das sementes, enquanto a variação da emergência foi negativamente relacionada com ela. Sementes longevas e com menor teor de água são mais tolerantes à dessecação e resistentes às condições adversas de umidade e temperatura presentes em áreas abertas no início da restauração (Vieira *et al.*, 2008; Tunjai & Elliott, 2012; Ribeiro & Borghetti, 2014; Ribeiro *et al.*, 2015). Esse é um dos motivos para seu sucesso e predomínio em áreas restauradas por semeadura direta (Tunjai & Elliott, 2012; Rodrigues *et al.*, 2019).

O sucesso de sementes ortodoxas na semeadura direta também é explicado por elas (i) apresentarem requisitos de armazenamento simples, (ii) concentrarem a dispersão no final da estação seca, período que antecede a temporada de semeadura, (iii) resultando em maior disponibilidade nas redes que comercializam as sementes (Lima *et al.*, 2008;

Vieira & Scariot, 2006a; Escobar, Silveira & Morellato, 2018; Schmidt *et al.*, 2019). Contudo, dentro das sementes longevas, houve menor estabelecimento nas que duram menos 12 meses. Uma boa explicação para isso foi que 68% das espécies com sementes que duram mais que 12 meses têm dormência física, enquanto apenas 36% das sementes que duram menos 12 meses têm dormência física. O tegumento ou endocarpo espesso presente na dormência física reduz a troca de gases, umidade e patógenos com o meio externo e atenua oscilações de temperatura, garantindo maior qualidade das sementes armazenadas por mais tempo (Lima *et al.*, 2008; Sautu *et al.*, 2007; Kildisheva *et al.*, 2020; Jiménez-Alfaro *et al.*, 2016).

As sementes ortodoxas que duram menos de 12 meses armazenadas sob temperatura ambiente, geralmente, têm o tegumento mais fino e permeável, permitindo a troca de gases, umidade e patógenos com o meio externo (Lima *et al.*, 2008; Sautu *et al.*, 2007; Baskin & Baskin, 2020; Kildisheva *et al.*, 2020). Por isso, elas perdem mais facilmente a viabilidade durante o armazenamento, especialmente se este for inadequado. Além disso, podem ser semeadas após ultrapassarem seu limite natural de longevidade. Isso é comum para espécies que duram de três a 12 meses e que são semeadas após 12 ou 24 meses de armazenamento. Por exemplo, *Aspidosperma* spp. e *Handroanthus* spp. são espécies com bom estabelecimento quando semeadas no ano da coleta, mas que não emergem no campo se forem semeadas após 12 meses de armazenamento sob temperatura ambiente (a longevidade delas variou de 3 a 6 meses, ver Tabela S8). Como muitos estudos omitiram a data de coleta, tempo e condições de armazenamento, acreditamos que muitas espécies com longevidade menor que 12 meses foram semeadas sem viabilidade. Por isso, pesquisar a longevidade de cada espécie sob as condições empregadas pelas redes de sementes é fundamental para direcionar quais devem ser semeadas no ano da coleta e quais podem ser armazenadas e semeadas nos anos seguintes.

Sementes que duram menos de um mês (alto teor de água e recalcitrantes) apresentaram a emergência mais baixa (5%) e a maior variação na emergência (126%). Isso provavelmente se deve à desidratação e morte devido à exposição direta ao sol ou por terem sido semeadas mortas. Seu armazenamento sob condição ambiente pode ser feito por apenas dias ou semanas e não suportam a desidratação e o armazenamento em baixas temperaturas no laboratório (Hong & Ellis, 1996; Sautu *et al.*, 2006). Esse motivo tem dificultado o uso de sementes úmidas em programas de restauração (Daws, Garwood & Pritchard, 2005; Daws *et al.*, 2008; Rodrigues *et al.*, 2019). Elas também concentram a dispersão durante o período mais chuvoso, logo após a temporada de semeadura direta

(Pritchard *et al.*, 2004; Sautu *et al.*, 2006; Salazar *et al.*, 2011; Escobar *et al.*, 2018). Porém, elas têm alto sucesso de estabelecimento na semeadura direta se forem semeadas logo após a coleta (Hooper *et al.*, 2002; Cole *et al.*, 2011). Seu sucesso pode quintuplicar se forem semeadas sob o dossel de uma vegetação secundária (Vieira & Scariot, 2006b; Laborde & Corrales-Ferrayola, 2012; Cole *et al.*, 2011), indicando que elas devem ser direcionadas para a semeadura direta de enriquecimento. Enterrá-las e cobri-las com uma cobertura de palhada ameniza as altas temperaturas e reduz a desidratação (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017), aumentando o sucesso das sementes úmidas a pleno sol. Por fim, elas também podem ser direcionadas para produção de mudas e plantadas sob o dossel da área que foi anteriormente semeada.

### **(3) A dormência foi uma característica chave para entender as diferenças no estabelecimento de plântulas**

Espécies com dormência endógena e combinada apresentaram menor emergência e estabelecimento, além de maior variação no estabelecimento, em comparação com sementes com dormência física e sem dormência. Uma explicação para isso é que as espécies com dormência endógena e combinada continuaram a emergir na segunda e terceira estação chuvosa. No entanto, avaliamos o estabelecimento apenas no primeiro ano, período em que os estudos originais concentraram a avaliação. Espécies com dormência fisiológica (e.g., *Alibertia edulis* e *Cecropia pachystachya*) dobraram o estabelecimento entre 12 e 24 meses, enquanto espécies com dormência morfofisiológica (e.g., *Annona coriacea* e *Annona crassiflora*) emergiram muito pouco no primeiro ano e aumentaram quatro e sete vezes a emergência na segunda e terceira estação chuvosa, respectivamente. Espécies com dormência combinada (e.g., *Acrocomia aculeata*, *Caryocar brasiliense* e *Syagrus oleracea*) emergiram apenas na segunda estação chuvosa e dobraram a emergência na terceira estação chuvosa. A dormência entre estações formou um banco de sementes e prolongou a fase de emergência por mais de dois anos.

Por outro lado, algumas espécies com dormência endógena ou combinada tiveram emergência baixíssima ou não emergiram como *Didymopanax morototoni*, *Didymopanax macrocarpum* (MD), *Diclinanona calycina*, *Duguetia riparia*, *Guatteria punctata* (MPD), *Aniba canelilla*, *Guarea guidonia*, *Mezilaurus itauba*, *Sacoglottis mattogrossensis* (PD), *Attalea maripa*, *Cochlospermum orinocense*, *Emmotum nitens*, *Myrsine gardneriana*, *Vitex megapotamica* e *Zanthoxylum rhoifolium* (PY+PD). Reconhecer a presença, o tipo de dormência e os requisitos ambientais necessários para superá-las é indispensável para

ampliar o uso de sementes dormentes na semeadura direta (Silveira, 2013; Baskin & Baskin, 2020; Kildisheva *et al.*, 2020). Sementes fisiologicamente dormentes podem ser semeadas no campo quando os sinais ambientais que ajudam a superar a dormência estiveram próximos de surgir ou após a aplicação de tratamentos de superação da dormência (Kildisheva *et al.*, 2020; Baskin & Baskin, 2020). Sementes morfológicamente dormentes geralmente precisam de um curto período de armazenamento para os embriões se desenvolverem antes que possam ser semeadas em campo (Kildisheva *et al.*, 2020; Baskin & Baskin, 2020). Sementes com dormência combinada podem ter a dormência física superada e serem levadas ao campo após o surgimento dos sinais ambientais que ajudam a superar a dormência fisiológica (Kildisheva *et al.*, 2020). Precisamos conduzir mais experimentos de emergência em campo sob diferentes condições ambientais para melhorar a eficiência de estabelecimento das espécies com dormência endógena e combinada.

O maior sucesso de estabelecimento de sementes não dormentes e com dormência física ocorreu por razões distintas. Sementes não dormentes absorvem água e germinam em até quatro semanas sob variadas condições ambientais (Baskin & Baskin, 2004; Kildisheva *et al.*, 2020). Por isso, essas sementes não apresentam limitações para atingir a emergência máxima na primeira estação de crescimento. No entanto, sementes não dormentes que demoram mais para iniciar a embebição podem alcançar um maior sucesso de estabelecimento (Laumann *et al.*, 2023). Por outro lado, a dormência física dentro da estação é uma solução baseada na natureza que retarda e espalha a emergência ao longo da primeira estação de crescimento (Garwood, 1983; Ten Brink, Gremer & Kokko, 2020; Correia *et al.*, 2022; Laumann *et al.*, 2023). Ela propicia que a emergência ocorra durante períodos com umidade no solo estável e dilui os riscos de falhas germinativas, especialmente em áreas abertas sujeitas a variações ambientais extremas (Garwood, 1983; Vieira *et al.*, 2008; Correia *et al.*, 2022).

Não avaliamos profundamente o papel da dormência física entre estações, que prolonga a emergência por mais de 12 meses (Garwood, 1983; Ten Brink *et al.*, 2020). A dormência física entre estações pode ser vantajosa para espécies que se beneficiam do aumento da cobertura de copas de 12 a 24 meses após a semeadura direta (Cole *et al.*, 2011). Nos estudos originais, algumas espécies clímax ou secundárias que podem se beneficiar da sombra continuaram emergindo após 12 meses (e.g. *Hymenaea courbaril* e *Hymenaea stigonocarpa*) e 24 meses (e.g. *Dimorphandra mollis*, *Joannesia princeps* e *Sapindus saponaria*). Algumas espécies pioneiras como *Enterolobium timbouva*,



*Guazuma ulmifolia* e *Tachigali vulgaris* também continuaram emergindo após 12 meses em áreas que ainda apresentavam dossel aberto. Estudos futuros podem investigar o papel da dormência física entre estações na dinâmica de recrutamento da comunidade.

#### **(4) Sementes planas, anemocóricas e zoocóricas apresentaram menor previsibilidade no estabelecimento de plântulas**

A variação no estabelecimento das sementes planas foi 44% maior do que a das sementes redondas, enquanto das sementes anemocóricas e zoocóricas foi 41% maior que das autocóricas. Portanto, essas características promoveram menor previsibilidade do estabelecimento na semeadura direta. Sementes planas e anemocóricas foram altamente correlacionadas, e sua maior variabilidade no estabelecimento provavelmente resulta da profundidade de enterramento (Doust *et al.*, 2006; Tunjai & Elliott, 2012; Silva & Vieira, 2017). Sementes planas têm dificuldade de emergir se o enterramento for profundo (Bond *et al.*, 1999; Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017). Possivelmente por apresentarem uma maior área de superfície, requerendo maior força motriz para elevar e romper a camada de solo na emergência (Bond *et al.*, 1999; Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017). Elas alcançam maior sucesso semeadas sobre a superfície do solo (Doust *et al.*, 2006; Silva & Vieira, 2017; Pellizzaro *et al.*, 2017), mas cobri-las com uma fina camada de solo (até *ca.* 0,5 cm) é vantajoso por protegê-las de predadores e variações ambientais extremas (Doust *et al.*, 2006; Pellizzaro *et al.*, 2017).

A maior variação no estabelecimento também é consequência do maior número de sementes vazias ou sem embrião em espécies anemocóricas (Honek, Martinkova & Saska, 2005; Perea, Venturas & Gil, 2013; Dayrell *et al.*, 2017). Produzir uma alta proporção de sementes vazias confunde os predadores e favorece que as sementes cheias superem o filtro da predação (Honek *et al.*, 2005; Perea *et al.*, 2013). Assim, o número de sementes vazias deve ser considerado na definição da densidade de semeadura de espécies anemocóricas. Por outro lado, o estabelecimento de sementes zoocóricas também variou significativamente, provavelmente porque a dispersão animal foi correlacionada com o maior teor de água e menor longevidade da semente. Portanto, elas são menos tolerantes à dessecação e mais sensíveis às condições ambientais adversas (Ribeiro & Borghetti, 2014; Ribeiro *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2021a). Por fim, a menor variação do estabelecimento de sementes autocóricas é explicada pelo fato de serem ortodoxas e 76% durarem mais de 12 meses. Portanto, são muito tolerantes à dessecação e às condições ambientais adversas (Ribeiro & Borghetti, 2014; Ribeiro *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2021a).

## **(5) Plântulas com cotilédones de reserva tiveram maior sucesso de emergência**

A emergência foi 7% maior nas plântulas com cotilédones de reserva e a variação da emergência foi 29% maior nas plântulas com cotilédones fotossintetizantes. Cotilédones de reserva foram associados a sementes maiores, vida longa e crescimento lento e o contrário observado para cotilédones fotossintetizantes. Dessa forma, a função cotiledonar complementou o papel da massa da semente na determinação da emergência. A importância da reserva cotiledonar na emergência e estabelecimento inicial na semeadura direta já havia sido levantada por outros trabalhos (Pereira *et al.*, 2013a; Silva & Vieira, 2017). A primeira vantagem da reserva energética disponível nos cotilédones é poder alocá-la para o maior alongamento do hipocótilo e epicótilo na germinação epígea e hipógea, respectivamente (Garwood, 1983; Kitajima, 1992; Ressel *et al.*, 2004). Isso permite que a semente germinada rompa a camada de solo e a plântula complete a emergência mesmo se estiver muito enterrada. Por outro lado, as plântulas com cotilédones fotossintetizantes podem emitir a radícula mas não ter energia suficiente para emergir sobre o solo (Silva & Vieira, 2017; Pellizzaro *et al.*, 2017).

Esperávamos que a função cotiledonar também afetasse a sobrevivência. Provavelmente isso não ocorreu porque parte da mortalidade na fase inicial de estabelecimento foi computada na emergência. Isso acontece porque os estudos originais avaliaram a emergência em intervalos de 7, 15 ou 30 dias, permitindo que parte das plântulas possam emergir e morrer entre os intervalos. Na fase inicial de estabelecimento, as reservas cotiledonares são alocadas para produção de raízes, caule e folhas, e potencializam a sobrevivência, crescimento e disputa por recursos (Kitajima, 2003; Santos & Buckeridge, 2004). As reservas alocadas para o caule garantem altura suficiente para escapar do sombreamento e as reservas alocadas para raiz garantem comprimento suficiente para buscar água e nutrientes fora da zona de influência das raízes de plantas daninhas. Por outro lado, as plântulas com cotilédones fotossintetizantes são fracas competidoras por luz, espaço, nutrientes e água em relação às plantas daninhas (Doust *et al.*, 2008; Pereira *et al.*, 2013a). O controle das plantas daninhas aumenta o estabelecimento das plântulas com cotilédones fotossintetizantes (Pereira *et al.*, 2013a; Passaretti *et al.*, 2020), deixando-as livres para fazer fotossíntese com os cotilédones foliáceos (Garwood, 1983; Kitajima, 1992) e investir na produção de folhas, crescimento aéreo e radicular.

Plântulas com cotilédones fotossintetizantes são mais dependentes das fontes externas de nutrientes na fase inicial do estabelecimento (Kitajima, 1992, 2003; Cortés-Flores *et al.*, 2020), os quais são pouco disponíveis nas áreas degradadas em processo de restauração. Elas são mais sensíveis à imprevisibilidade das chuvas e veranicos, além de serem mais afetadas pela herbivoria e danos mecânicos (Kitajima, 2003; Green & Juniper, 2004; Santos & Buckeridge, 2004; Cortés-Flores *et al.*, 2020; Correia *et al.*, 2022). Para potencializar o estabelecimento de plântulas com cotilédones fotossintetizantes podemos (i) realizar a sementeira sob condições de umidade do solo estáveis, (ii) garantir precisão na profundidade de enterramento, (iii) controlar as plantas daninhas, (iv) controlar formigas, (v) corrigir a fertilidade do solo (química e/ou orgânica). Além disso, tecnologias emergentes da agricultura (e.g., enraizadores, promotores de crescimento, inoculação de micorrizas e bactérias) podem ser usadas para potencializar seu estabelecimento (Madsen *et al.*, 2016a; Williams *et al.*, 2016; Pedrini *et al.*, 2020a).

#### **(6) O paradoxal efeito da velocidade de crescimento sobre a emergência**

A velocidade de crescimento foi responsável por apenas 7% da variabilidade explicada da emergência. A baixa contribuição da velocidade de crescimento ocorreu porque ela foi fortemente associada à massa da semente e à função cotiledonar, que juntas foram responsáveis por 64% da variabilidade explicada. Contudo, plantas com crescimento muito rápido e rápido emergiram 8% mais que as plantas com crescimento moderado e lento, após descontado o efeito da massa da semente e da função cotiledonar. O sucesso de emergência das plantas de crescimento rápido provavelmente tem sido menosprezado em modelagens univariadas (Doust *et al.*, 2008; Souza & Engel, 2018). Isso acontece porque uma característica sem efeito sozinha pode apresentar efeito na presença de outra característica, assim como pode perder o efeito (Laumann *et al.*, 2023; Piotrowski *et al.*, 2023). Por outro lado, o efeito da velocidade de crescimento em favor das plantas de crescimento rápido não invalida o sucesso de emergência das plantas de crescimento lento, que foi retido pelas sementes maiores e com reservas cotiledonares.

Plantas de crescimento rápido precisam aproveitar a curta janela de dossel aberto e solo exposto para emergir e estabelecer o maior número possível de indivíduos no início da restauração de uma área (Cornelissen, Diez & Hunt, 1996; Finegan, 1996; Dalling *et al.*, 1998; Grime, 2006; Moles & Leishman, 2008). Isso ocorre porque, com passar o tempo e aumento da sombra e fertilidade do solo, elas são substituídas por espécies de crescimento lento que são competidoras superiores (Finegan, 1996; Grime, 2006; Moles

& Leishman, 2008). A função das plantas de crescimento rápido é cobrir o solo e estruturar a vegetação nos primeiros anos do processo de restauração (Freitas *et al.*, 2019; Rodrigues *et al.*, 2019; Sampaio *et al.*, 2019). Plantas de crescimento muito rápido garantem a formação da capoeira baixa nos primeiros 4 anos, e as plantas de crescimento rápido as substituem formando uma capoeira mais alta em até 10 anos na restauração florestal com semeadura direta (Freitas *et al.*, 2019; Vieira *et al.*, 2020). *Mabea fistulifera*, *Senna alata* e *Sesbania virgata* são exemplos de espécies com crescimento muito rápido, enquanto *Clitoria fairchildiana*, *Enterolobium timbouva* e *Tachigali vulgaris* são exemplos de espécies com crescimento rápido.

### **(7) A zona de vida bioclimática foi um importante preditor para a sobrevivência**

A zona de vida bioclimática preferencial das espécies foi responsável por 24% e 36% da variabilidade explicada da sobrevivência e variação da sobrevivência, respectivamente. Espécies de savana e floresta tropical seca tiveram sobrevivência 19% maior que espécies de floresta tropical chuvosa e a variação da sobrevivência foi 37% maior nas espécies de floresta tropical chuvosa. Ecossistemas mais duros (e.g., distúrbios frequentes, precipitação sazonal e com umidade e temperatura mais variável) favorecem a seleção de características (e.g., banco de gemas subterrâneo, raízes com reservas de amido, raízes longas, maior eficiência no uso da água e na atividade estomática) que conferem maior sobrevivência individual (Hoffmann, Orthen & Franco, 2004; Vieira & Scariot, 2006a; McDonald, McLaren & Newton, 2010; Pausas *et al.*, 2018; Salazar *et al.*, 2012a). Isso explica a maior sobrevivência de espécies de savana e floresta tropical seca. Porém, quanto maior o investimento em sobrevivência individual, menor é a produção de sementes e pressão de propágulos (McDonald *et al.*, 2010; Salazar *et al.*, 2012a, 2012b).

Por outro lado, as espécies de floresta tropical chuvosa investem mais na produção de sementes e pressão de propágulos, pois a precipitação é praticamente contínua e o fogo natural não é uma pressão seletiva relevante (Walter, 1986; Finegan, 1996; Hoffmann *et al.*, 2004; Vieira & Scariot, 2006a; McDonald *et al.*, 2010). Dessa forma, a maior quantidade de sementes disponíveis permite aumentar a densidade de semeadura e compensar a menor sobrevivência individual da plântula. Além disso, técnicas de manejo podem aumentar a sobrevivência e diminuir a variação da sobrevivência de espécies de floresta tropical chuvosa. Aplicar uma (i) cobertura de palhada sobre o solo para reduzir as flutuações de temperatura e umidade (Woods & Elliott, 2004; Doust *et al.*, 2006) e (ii) semear plantas de cobertura de crescimento rápido para atenuar extremos microclimáticos

pode aumentar a sobrevivência das plântulas (Campos-Filho *et al.*, 2013; Silva *et al.*, 2015; Reis *et al.*, 2019). Além disso, espécies sensíveis ao dossel aberto e solo exposto podem ser direcionadas para semeadura direta de enriquecimento (Camargo *et al.*, 2002; Hooper *et al.*, 2002; Cole *et al.*, 2011).

## V. Conclusões

(1) Este estudo investigou como as características das sementes e plântulas afetam a emergência, a sobrevivência e o estabelecimento no primeiro ano após a semeadura direta, propondo soluções práticas para que as características menos vantajosas possam superar as barreiras impostas ao método de restauração. O sucesso de emergência, sobrevivência e estabelecimento foi positivamente relacionado com a massa das sementes, a principal característica responsável pela montagem das comunidades implantadas com a semeadura direta. Para favorecer o estabelecimento de espécies com sementes pequenas, é necessário: (i) aumentar a densidade de semeadura à medida que a massa unitária das sementes diminui, (ii) garantir maior precisão no enterramento, (iii) implementar um controle efetivo de plantas daninhas e (iv) realizar mais testes com peletização para avaliar sua eficácia na superação de filtros ecológicos.

(2) O sucesso de emergência e estabelecimento foi positivamente relacionado com a longevidade das sementes, sendo os piores resultados observados para as sementes com durabilidade inferior a 12 meses. Mesmo para sementes ortodoxas, é preciso melhorar o armazenamento e entender os limites naturais de longevidade sob condições ambientais de armazenamento. A partir disso, é possível decidir se as sementes podem ser armazenadas por longo prazo ou semeadas apenas no ano da coleta. Para sementes com durabilidade inferior a um mês, as estratégias recomendadas são: (i) coleta seguida de imediata semeadura; (ii) semeadura sob sombra para evitar a dessecação; ou (iii) direcionamento para o plantio de mudas.

(3) O sucesso de emergência e estabelecimento das sementes com dormência endógena e combinada foi menor que das sementes com dormência física ou sem dormência. Para melhorar seu desempenho mais estudos são necessários para entender os (i) sinais ambientais que ajudam a superar a dormência, (ii) o período e condições de armazenamento para os embriões se desenvolverem antes da semeadura direta ou (iii) aplicar técnicas superação de dormência eficazes e/ou não prejudiciais para as condições de campo. Além disso, algumas espécies com dormência endógena, física e combinada continuam emergindo na segunda e terceira estação chuvosa após a semeadura direta.

Assim, é preciso investigar o papel da dormência entre estações na dinâmica de recrutamento da comunidade na semeadura direta.

(4) O estabelecimento das sementes planas, anemocóricas e zoocóricas foi mais imprevisível e variável. Para reduzir a imprevisibilidade e aumentar o sucesso é preciso (i) maior precisão no enterramento para as sementes planas e anemocóricas, (ii) contabilizar o número de sementes vazias de espécies anemocóricas e compensá-la aumentando a densidade de semeadura e (iii) evitar a semeadura das sementes zoocóricas úmidas sob condições ambientais adversas.

(5) A emergência foi menor e mais variável para plântulas com cotilédones fotossintetizantes. Para aumentar seu sucesso é preciso (i) realizar a semeadura sob condições de umidade do solo estáveis, (ii) maior precisão no enterramento, (iii) controle efetivo de plantas daninhas e (iv) formigas.

(6) A sobrevivência de espécies de floresta tropical chuvosa foi menor e mais variável, contudo, elas apresentaram maior produção de sementes e pressão de propágulos. O que permite aumentar a densidade de semeadura e compensar a menor sobrevivência individual da plântula. A sobrevivência delas também pode aumentar (i) aplicando uma cobertura de palhada sobre o solo e (ii) em consórcio com plantas de cobertura de crescimento rápido.

## **VI. Informações suplementares - Capítulo 3**

Informações adicionais de suporte podem ser encontradas online na seção de Informações Suplementares ao final do Capítulo.

**Tabela S1.** Planilha excel com as referências completas da pesquisa (referências).

**Tabela S2.** Planilha excel com os metadados disponíveis da referência 110 (referência 110).

**Tabela S3.** Planilha excel com os metadados disponíveis da referência 111 (referência 111).

**Tabela S4.** Planilha excel com os dados de emergência.

**Tabela S5.** Planilha excel com os dados de sobrevivência.

**Tabela S6.** Planilha excel com os dados de estabelecimento.

**Tabela S7.** Planilha excel com os metadados das características funcionais.

**Tabela S8.** Planilha excel com as características funcionais de sementes e plântulas por espécie.

**Tabela S9.** Planilha excel com as referências das características funcionais de sementes e plântulas.

**Tabela S10.** Planilha excel com a metodologia utilizada no Laboratório de Fisiologia de Sementes da Embrapa.

**Tabela S11.** Planilha excel com as referências utilizadas na elaboração da Tabela 1.

**Tabela S12.** Planilha excel com os modelos selecionados nas análises dos dados.

**Para baixar:**

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1pOWDkSEAXe81h1BS9l00fiK6GSGe8K5f/edit?usp=sharing&ouid=103524157042346051163&rtpof=true&sd=true>

## **Conclusões gerais**

**Não é verdade que a semeadura direta gera baixo estabelecimento.** Quando se compara os percentuais médios de estabelecimento da semeadura direta com os percentuais médios de estabelecimento de ambientes naturais, observamos que a semeadura direta pode potencializar o estabelecimento das espécies nativas em até 13 vezes. O sucesso das espécies pode ser ainda maior com um manejo cuidadoso na etapa de coleta, armazenamento, preparação das sementes, semeadura e manutenção da área. Mesmo para produção de mudas, uma semente não significa uma muda para se levar ao campo. De maneira alguma, podemos comparar os percentuais de estabelecimento de espécies nativas com os percentuais atingidos por espécies agrícolas. As últimas, foram carinhosamente selecionadas ao longo de milênios de manipulação humana.

**Metade das sementes semeadas no campo não apresentam viabilidade.** A germinabilidade impôs a maior perda de sementes ao longo da transição da semente para a plântula estabelecida. Para melhorar a qualidade das sementes é necessário coletar as sementes após a maturação fisiológica, processá-las com métodos que conservem sua viabilidade, armazenando-as em embalagens herméticas, sob temperatura e umidade que conservem sua viabilidade, e livres de predadores e patógenos, sempre considerando a longevidade natural de cada espécie. Portanto, precisamos que os laboratórios de sementes, universidades e institutos de pesquisa criem protocolos de coleta, beneficiamento e armazenamento adaptados para a realidade das espécies nativas. Muita informação básica precisa ser produzida ou desengavetada para fomentar a restauração baseada em sementes.

**A germinabilidade do lote de sementes no laboratório não prediz o estabelecimento no campo.** Essa relação não existe porque, no campo, as sementes estão sujeitas às flutuações de temperatura e umidade, falta de enterrando, enterrando excessivo, ambiente de luz inadequado e predação. Por outro lado, as condições controladas no laboratório fornecem umidade constante e baixa variação de temperatura, favorecendo percentuais de emergência mais altos que no campo. Contudo, 19% das espécies emergiram com percentuais mais altos no campo do que em condições controladas de laboratório. Portanto, a germinação em laboratório não pode ser tratada como uma aproximação do que vai emergir em campo. Para fomentar a restauração com sementes nativas em larga escala, precisamos de protocolos mais simples para avaliar a viabilidade das sementes. Exemplos incluem o teste de tetrazólio, o teste de flutuação das sementes em água ou



corde para inspeção visual da qualidade da semente e embrião. Além disso, sugerimos que a pesquisa deve combinar a germinação em laboratório e viveiro com emergência e estabelecimento no campo para avaliar a viabilidade ecológica das espécies nativas.

**A fase de emergência em campo foi responsável por 30% da perda de sementes ao longo da transição da semente para a plântula estabelecida.** Para aumentar a eficácia da sementeira direta e desperdiçar o menor número possível de sementes, precisamos considerar que a fase de emergência é prioritária para o monitoramento e manejo. O monitoramento dessa fase serve para descobrir os problemas que podem ser corrigidos no presente ou aqueles que não podem mais ser corrigidos, mas que devem ser internalizados e considerados nas próximas áreas. Para melhorar a fase de emergência é preciso controlar de forma eficaz as plantas daninhas antes e após a sementeira direta, aplicar quantidades de sementes adequadas por espécie ou grupo funcional, escolher o momento ótimo de umidade do solo para fazer a sementeira, enterrar as sementes em profundidade adequada, aplicar tratamentos pré-germinativos apenas quando necessários, escolher o ambiente de luz (*i.e.*, pleno sol ou sob dossel) ideal para cada espécie e grupo funcional, e reduzir ao máximo a predação de sementes e plântulas.

**A fase de emergência na sementeira direta dura pelo menos três estações chuvosas.** A maioria das espécies emergiram nos primeiros seis meses após a sementeira direta. Contudo, várias espécies com dormência física, combinada ou endógena continuaram emergindo até o terceiro ano de monitoramento nos estudos originais. Espalhar a emergência por mais de duas estações de crescimento é uma estratégia de cobertura de apostas, que ajuda as espécies a diluírem os riscos de mortalidade ao longo do tempo. O papel da dormência entre estações na dinâmica de recrutamento da comunidade precisa ser considerado nas pesquisas futuras com sementeira direta.

**A mortalidade após a fase de emergência foi muito baixa.** A mortalidade pós emergência representou apenas 10% da perda de sementes ao longo da trajetória da semente para a plântula estabelecida. Os percentuais de sobrevivência na sementeira direta são comparáveis ao de plantios de mudas com alto sucesso e superiores aos observados em áreas de regeneração natural. O controle efetivo de plantas daninhas, o consórcio com plantas de cobertura de crescimento rápido e a aplicação de cobertura morta sobre o solo estão entre as estratégias que maximizam a sobrevivência.

**As métricas de sucesso que consideram o número de plantas produzidas por sementes viáveis, por grama e por dólar investido na restauração são melhores que a métrica usual (plantas/sementes semeadas).** A métrica usual de estabelecimento desconsidera que metade das sementes não são viáveis, que há uma variação interespecífica de até 82 mil vezes no investimento de uma planta para produzir uma semente, e desconsidera a variação interespecífica de até 94 vezes no custo de produção de uma semente com base nas espécies estudadas. Considerar o número de sementes viáveis, a massa semeada e o investimento no denominador da equação mostram-se indispensáveis para avaliar a viabilidade ecológica das espécies na semeadura direta e selecionar o método de implantação no campo. Além disso, o estabelecimento global aumentou 12% quando o número de sementes viáveis foi considerado e as sementes pequenas passaram a ser mais custo-efetivas quando a massa e o custo da semente, plantio e manutenção foram considerados no denominador da equação de sucesso.

**A semeadura direta é limitada, mas o plantio de mudas pode complementá-la.** Oitenta e quatro por cento das espécies analisadas são secas e ortodoxas, o que pode ser explicado pela maior longevidade das sementes, armazenamento simplificado e dispersão concentrada antes da temporada de semeadura. Espécies raras, recalcitrantes, com curta longevidade, que se dispersam após a temporada de semeadura direta ou que não emergem em campo podem ser direcionadas para o plantio de mudas. A semeadura direta e o plantio de mudas podem ser usados simultaneamente ou em etapas subsequentes para atingir os objetivos da restauração. Acreditamos que uma abordagem integrada entre os dois métodos é a melhor alternativa para dar escala para restauração. Enquanto a semeadura possibilita ganhos de escala e estruturação rápida da comunidade, o plantio de mudas consegue abarcar todos os grupos funcionais necessários para a autossuficiência regenerativa. Especialmente em paisagens muito desmatadas e fragmentadas, que contribuirão muito pouco com propágulos para a continuidade da regeneração. Por fim, a escolha entre sementes e mudas para cada espécie deve levar em conta o custo-efetividade contexto dependente.

**Tratamentos pré-germinativos (pré-embebição das sementes em água e superação da dormência) não devem ser adotados automaticamente na semeadura direta.** No laboratório e viveiro, os tratamentos pré-germinativos servem para acelerar e sincronizar a germinação das espécies e favorecer uma produção homogênea de plântulas e mudas. Em vários ecossistemas não tropicais, a quebra de dormência melhora o sucesso das

espécies na sementeira direta. Por outro lado, eles podem gerar desvantagens na sementeira direta tropical. A embebição lenta e a dormência pode ser vantajosa para diluir os riscos de mortalidade em massa devido a imprevisibilidade das chuvas, veranicos e herbivoria. Mas a quebra de dormência pode aumentar o estabelecimento de espécies pioneiras, que precisam germinar e se estabelecer sob condições de dossel aberto. No entanto, como não houve diferença significativa entre sementes intactas e previamente tratadas, fica evidente a necessidade de mais experimentos de campo que avaliem o custo-benefício da quebra de dormência por espécie, grupo ecológico e região bioclimática.

**Enterrar sementes é uma técnica agrícola altamente eficaz.** O estabelecimento dobrou quando as sementes foram enterradas e saltou de 5% para 21% nas sementes úmidas e plântulas com reservas cotiledonares. Esse grupo funcional conservativo tem mais energia estocada para emergir de baixo do solo e evitam a dessecação que ocorreria caso ficassem sobre o solo. Plântulas oriundas de sementes planas e pequenas emergem melhor quando semeadas na superfície do solo ou enterradas com uma fina camada de solo. O enterramento raso para sementes planas e pequenas é benéfico, contudo, deve ser feito com uma camada de solo de no máximo duas vezes a espessura da semente (até *ca.* 0,5 cm). Os implementos agrícolas podem ser adaptados e regulados para garantir maior precisão na sementeira de espécies nativas, como ocorre na sementeira de espécies agrícolas. A incorporação das sementes com grade niveladora, deve ser feita com uma grade leve, passada lentamente e totalmente fechada para não enterrar as sementes em profundidades maiores que 2 ou 3 cm. O enterramento com o pé, enxada ou matraca também precisa ser mais cuidadoso. Para isso, os trabalhadores envolvidos na sementeira direta precisam de orientação e treinamento. Além disso, desenvolver implementos específicos para a sementeira direta de espécies nativas pode melhorar ainda mais a precisão no enterramento de sementes em grande escala.

**Aplicar uma cobertura de palhada morta aumentou o estabelecimento das sementes não enterradas.** O enterramento por si só foi suficiente para amenizar a dessecação das sementes e plântulas das sementes enterradas. Contudo, essa técnica pode ser mais benéfica se a cobertura de palhada for cortada e repostada sobre o solo a cada manejo da entrelinha, especialmente na sementeira em linhas ou covas. Neste caso, a sobrevivência das plântulas pode aumentar, porque a umidade do solo fica conservada por mais tempo durante eventos de seca e as plantas daninhas têm dificuldade de emergir sob a palhada.

**A fertilização do solo não deve ser adotada de maneira automática.** Estudar os requisitos nutricionais das espécies e ecossistemas é fundamental para não desperdiçar fertilizantes e ainda comprometer a emergência e sobrevivência das espécies. A fertilização orgânica reduziu o estabelecimento das espécies de savana. Algumas espécies de savana também respondem negativamente à fertilização química, morrendo quando as sementes ou raízes entram em contato direto com o adubo. Para as espécies florestais, a fertilização química, orgânica e calagem do solo é indicada após análise do solo.

**Plantas de adubação verde ou agrícolas facilitam o estabelecimento de espécies nativas florestais.** Plantas de cobertura, além de reduzir os custos com o controle de plantas daninhas, atuam como pioneiras de vida curta e facilitam o estabelecimento das espécies nativas florestais. Seus benefícios vão muito além da adubação verde, que talvez seja sua menor contribuição. Elas sombreiam as plantas daninhas, atenuam extremos de temperatura e umidade, promovem o controle erosivo, adicionam matéria orgânica ao solo, aumentam a disponibilidade de água no solo, promovem a retenção de nutrientes no solo e são preferencialmente consumidas por formigas. Contudo, quando semeadas em alta densidade, podem comprometer o estabelecimento das espécies nativas. Nesses casos, elas podem ser desbastadas seletivamente e depositadas sobre o solo.

**Plantas de cobertura de crescimento rápido podem facilitar ainda mais o estabelecimento se a semeadura for feita em duas etapas.** No primeiro ano, sementes de adubação verde, agrícolas e espécies nativas arbustivas podem ser semeadas para estabelecer uma camada arbustiva baixa. No segundo ano, as plantas de cobertura podem ser removidas por roçada ou capina seletiva apenas nas faixas onde as linhas ou covas serão abertas para realização da semeadura direta das espécies nativas de vida longa.

**O manejo integrado das plantas daninhas é uma etapa crítica.** O manejo delas deve ser feito antes e nas primeiras semanas e meses que seguem semeadura direta. O controle das plantas daninhas dobrou o estabelecimento das espécies nativas. O estabelecimento aumentou de 22% para 41% para sementes grandes, de 19% para 41% para plântulas com germinação hipógea e cotilédones de reserva, e de 6% para 15% para plântulas com cotilédones foliáceos. Mostrando que essa técnica de manejo favorece as plântulas conservativas e aquisitivas. As plântulas liberadas da competição, podem investir na produção e alongamento das raízes, no crescimento do caule e na produção de folhas. Plantas daninhas, especialmente gramíneas exóticas invasoras, são o principal filtro biológico para o estabelecimento das espécies nativas nas áreas em restauração no Brasil.

O uso de herbicidas de amplo espectro ou seletivos é fundamental para o ganho de escala com a restauração. Contudo, os trabalhadores precisam de orientação e treinamento para seguir protocolos rigorosos para manuseio e aplicação de herbicidas, evitando a contaminação ambiental, e usar equipamentos de proteção individual, evitando a exposição dos trabalhadores.

**A sementeira direta de espécies florestais deve ser feita em duas etapas.** Primeiro, devem ser semeadas as espécies pioneiras, secundárias, clímax exigentes de luz e as espécies com sementes secas. Elas se beneficiam ou toleram a condição de pleno sol para se estabelecer. Espécies pioneiras reduziram o estabelecimento de 15% em pleno sol para 3% sob a sombra do dossel. A segunda sementeira deve incluir as espécies clímax tolerantes à sombra e com sementes úmidas. Essas espécies são mais sensíveis às flutuações de umidade e temperatura e requerem sombra para se estabelecer. Espécies clímax tolerantes à sombra aumentaram o estabelecimento de 8% em pleno sol para 28% sob a sombra do dossel. A segunda sementeira pode ser realizada quando a floresta secundária gerada na primeira etapa de sementeira atingir de 50 a 70% de cobertura de dossel. A segunda etapa de sementeira pode ser desnecessária se a fauna trouxer as sementes das espécies tardias e elas se estabelecerem com sucesso.

**As sementes pequenas são mais restringidas pelos filtros que operam na sementeira direta.** Para favorecer as espécies com sementes pequenas é preciso que a densidade de sementeira aumente à medida que a massa unitária das sementes diminui, aplicar a sementeira sobre superfície ou garantir maior precisão no enterramento. O controle efetivo de plantas daninhas também é indispensável para favorecer as plântulas de sementes pequenas. Além disso, a peletização é uma inovação que permite adicionar repelentes, formicidas, enraizadores, nutrientes e inóculos de fungos e bactérias. Esses aditivos, podem melhorar a emergência, crescimento inicial, capacidade competitiva e aliviar a predação. A peletização também permite aumentar e padronizar o tamanho das sementes, possibilitando um maior controle na profundidade de enterramento e adaptação da semente na boca de saída dos maquinários usados na sementeira direta.

**O sucesso das espécies foi positivamente relacionado com a longevidade das sementes em condições naturais.** Sementes que duram menos de 12 meses, incluindo sementes secas e ortodoxas pouco longevas, apresentaram menor sucesso de estabelecimento no campo. Mesmo para sementes ortodoxas, é preciso melhorar o armazenamento e entender os limites naturais de longevidade sob condições ambiente de

armazenamento. Sementes de curta longevidade geralmente apresentam tegumento mais fino e permeável, que permite a troca de gases, umidade e patógenos com o meio externo e por isso duram menos no armazenamento. Precisamos de mais pesquisa básica e aplicada, bem como desengavetar estudos, que avaliem a longevidade das sementes em diferentes condições de armazenamento. Os estudos devem dar um enfoque especial para o armazenamento em condição ambiente, por ser o mais praticado pelas redes que comercializam sementes, por ser mais barato e escalável. Conhecer os limites naturais de longevidade de cada espécie permite decidir quais podem ser armazenadas por longo prazo e quais precisam ser semeadas apenas no ano da coleta. As sementes úmidas e recalcitrantes que duram menos de um mês podem ser coletadas e semeadas imediatamente, semeadas sob sombra para evitar a dessecação ou direcionamento para produção de mudas no viveiro e o plantio de mudas de enriquecimento.

**O sucesso de estabelecimento das sementes com dormência endógena e combinada foi baixo.** Para melhorar seu desempenho, precisamos de estudos para entender os sinais ambientais que ajudam a superar a dormência, o período e condições de armazenamento para os embriões se desenvolverem antes da semeadura direta ou aplicar técnicas de superação da dormência custo-efetivas e não prejudiciais para as condições de campo. Além disso, algumas espécies com dormência endógena, forte dormência física ou combinada continuaram emergindo na segunda e terceira estação chuvosa. Os estudos futuros podem investigar o papel da dormência entre estações na dinâmica de recrutamento da comunidade na semeadura direta.

**O maior sucesso da dormência física precisa ser considerado.** Especialmente aquela que espalha a emergência durante a primeira estação de crescimento. Já vimos que a superação da dormência pode ser ruim na semeadura direta tropical. A embebição lenta e a dormência física dentro da estação são soluções naturais que retardam e espalham a emergência ao longo da primeira estação de crescimento. Isso favorece que a emergência ocorra durante períodos com umidade no solo estável, diluindo os riscos de falhas germinativas, especialmente em áreas abertas e sujeitas a variações ambientais extremas. A pesquisa aplicada com sementes nativas pode investir em peletes hidrofóbicos que atrasam a embebição e imitam os efeitos da dormência física dentro da estação. Especialmente para sementes pequenas, planas, não dormentes e plântulas com cotilédones foliáceos, que são mais sensíveis a variação na temperatura e umidade do solo em áreas abertas e com alta incidência solar.

**O estabelecimento das sementes planas e anemocóricas foi mais imprevisível.** Para reduzir a imprevisibilidade e aumentar o sucesso das sementes planas e anemocóricas é preciso maior precisão no enterramento ou semeadura sobre a superfície do solo. A maior variação no estabelecimento também é consequência do maior número de sementes vazias ou sem embrião em espécies anemocóricas. Produzir uma alta proporção de sementes vazias confunde os predadores e favorece que as sementes cheias superem o filtro da predação. O número de sementes vazias precisa ser contabilizado e compensado, aumentando a densidade de semeadura à medida que o número de sementes cheias diminui. Sementes vazias também podem ser eliminadas no beneficiamento, a partir de técnicas de manejo escaláveis, como uso de ventiladores e sopradores de ar.

**O sucesso de estabelecimento foi menor e mais variável para plântulas com cotilédones fotossintetizantes.** A primeira vantagem da reserva energética disponível nos cotilédones é poder alocá-la para o maior alongamento do hipocótilo e epicótilo na germinação epígea e hipógea, respectivamente. As reservas cotiledonares podem ser alocadas para produção de raízes, caule e folhas, e potencializam a sobrevivência, crescimento e disputa dos recursos com as plantas daninhas. Para potencializar o estabelecimento de plântulas sem reservas nos cotilédones (PEF e FHF) devemos realizar a semeadura sob condições de umidade do solo estáveis, garantir precisão na profundidade de enterramento, controlar as plantas daninhas, controlar formigas e corrigir a fertilidade do solo quando isso for benéfico. Tecnologias emergentes da agricultura (e.g. enraizadores, promotores de crescimento, inoculação de micorrizas e bactérias) também podem ser usadas para potencializar seu estabelecimento.

**O sucesso de sobrevivência de espécies de floresta tropical chuvosa foi menor e mais variável.** Espécies de floresta tropical chuvosa investem mais na produção de sementes e pressão de propágulos. Isso permite aumentar a densidade de semeadura e compensar a menor sobrevivência individual da plântula. A sobrevivência delas também pode aumentar aplicando uma cobertura de palhada sobre o solo e em consórcio com plantas de cobertura de crescimento rápido. Espécies de savana e floresta tropical seca tiveram sobrevivência 19% maior que espécies de floresta tropical chuvosa. Ecossistemas mais duros (e.g. distúrbios frequentes, precipitação sazonal e com umidade e temperatura mais variável) favorecem a seleção características (e.g., banco de gemas subterrâneo, raízes com reservas de amido, raízes longas, maior eficiência no uso da água e na atividade estomática) que conferem maior sobrevivência individual.

**Com mais cuidado e técnicas de manejo podemos garantir maior viabilidade das sementes e sucesso de estabelecimento das plântulas nativas no campo.** Tentamos fugir de revisões puramente descritivas, que apenas sintetizam proporções, médias e relações, e partimos para o caminho da ecologia da intervenção. Neste caminho, descobrimos as fases mais críticas para a transição da semente para a plântula estabelecida e as características funcionais que são restringidas pelo método. Para resolver isso, sugerimos técnicas de manejo escaláveis que podem aumentar o sucesso das espécies. Também sugerimos caminhos para pesquisa explorar e melhorar a restauração com sementes no Brasil. A semeadura direta é um dos métodos de restauração possíveis dentro do leque de possibilidades. Ela pode ajudar a dar escala à restauração ecológica no Brasil.



Cada semente lançada na terra, é como uma nova criança nascida, uma nova esperança. Em tempos de desesperança e sentimento generalizado de que fim da história se aproxima, precisamos renovar as utopias. Não para chegar até elas, mas para que elas iluminem o caminho para um mundo mais justo e fraterno. Os povos oprimidos, os bichos, as plantas, o esturro dos rios e grotões nos dias de chuva, a pedra que rola, aquilo que vibra e aquilo que não conseguimos mais ouvir, tudo isso precisa de cuidado.

**Cultivar, plantar e replantar é preciso.**



## Apêndice

Referências dos estudos originais usados para confecção dos três capítulos da tese.

Número	Tipo de publicação	País	Referências
1	Artigo revisado por pares	Brasil	Aguirre, A. G., Lima, J. T., Teixeira, J., & Gandolfi, S. (2015). Potencial da semeadura direta na restauração florestal de pastagem abandonada no município de Piracaia, SP, Brasil. <i>Hoehnea</i> , 42, 629-640.
2	Tese de doutorado	Brasil	Almeida, N. D. (2004). Implantação de matas ciliares por plantio direto utilizando-se sementes peletizadas. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Lavras. 269 p
3	Tese de doutorado	Brasil	Amaral, C. S. (2019). Estratégias de restauração ecológica em pilha de rejeito de quartzito em ambiente rupestre. Tese de Doutorado - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. 93 p
4	Dissertação de mestrado	Brasil	Andrade, A. F. (2019). Efeitos da aplicação de herbicida, manejo de solo e semeadura direta para a restauração de área savânica na Floresta Nacional de Brasília. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 53 p
5	Artigo revisado por pares	Brasil	Aniceto, A. F. B., Ikeda-Castrillon, S. K., Fernandez, J. R. C., Martins, B. A. A., Duarte, Í. S., & de Moraes, F. F. (2021). Avaliação de técnicas de semeadura direta e da transposição de serapilheira para a emergência e estabelecimento da Manduvi ( <i>Sterculia apetala</i> (jacq). Karts.) em trabalho de restauração ecológica numa

			área de nascentes degradadas no Pantanal Mato-grossense. <i>Research, Society and Development</i> , 10(2), e4510212185-e4510212185.
6	Dissertação de mestrado	Brasil	Araki, D. F. (2005). Avaliação da semeadura a lanço de espécies florestais nativas para recuperação de áreas degradadas. Piracicaba, SP. Dissertação de Mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 151 p
7	Dissertação de mestrado	Brasil	Barbosa, A. C. C. (2008). Recuperação de área degradada por mineração através da utilização de sementes e mudas de três espécies arbóreas do cerrado, no Distrito Federal. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 88 p
8	Artigo revisado por pares	Brasil	Barni, P. E., & Almeida, N. O. (2018). Avaliação do enriquecimento de capoeira por meio de semeadura direta de mogno e cedro. <i>Revista Eletrônica Casa de Makunaima</i> , 1(2), 90-99.
9	Dissertação de mestrado	Brasil	Basso, F. D. A. (2008). Hidrossemeadura com espécies arbustivo-arbóreas nativas para preenchimento de áreas degradadas na Serra do Mar. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 83 p
10	Dissertação de mestrado	Brasil	Bellemo, A. C. (2017)a. Formação de dossel no curto prazo, como estratégia de restauração florestal. Cap 1. Semeadura direta de espécies de adubação verde na entrelinha da semeadura direta de espécies nativas de recobrimento. (Dissertação, Universidade de São Paulo).

11	Dissertação de mestrado	Brasil	Bellemo, A. C. (2017)b. Formação de dossel no curto prazo, como estratégia de restauração florestal. Cap 2. Semeadura direta manual de espécies nativas florestais de recobrimento. (Dissertação, Universidade de São Paulo).
12	Monografia	Brasil	Bernucci, G. L. K. (2021). Restauração florestal: semeadura direta e efeitos do uso de inoculantes no desenvolvimento de espécies arbóreas. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos. 35 p
13	Dissertação de mestrado	Brasil	Bertacchi, M. I. F. (2012a). Micro-sítio como filtro para o estabelecimento de regenerantes arbóreos em áreas restauradas. Capítulo 3. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 116 p
14	Dissertação de mestrado	Brasil	Bertacchi, M. I. F. (2012b). Micro-sítio como filtro para o estabelecimento de regenerantes arbóreos em áreas restauradas. Capítulo 4. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 116 p
15	Artigo revisado por pares	México	Bonilla-Moheno, M., & Holl, K. D. (2010). Direct seeding to restore tropical mature-forest species in areas of slash-and-burn agriculture. <i>Restoration Ecology</i> , 18, 438-445.
16	Dissertação de mestrado	Brasil	Brant, H. S. C. (2015). Qualidade das sementes e emergência da plântula de espécies de recobrimento para restauração de florestas estacionais semidecíduais. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 161 p

17	Tese de doutorado	Brasil	Bruziguessi, E. P. (2016). Árvores nativas do cerrado na pastagem: Por quê? Como? Quais?. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. 163 p
18	Dissertação de mestrado	Brasil	Calixto Júnior, J. E. D. (2018). Semeadura direta consorciada com plantio de mudas: teste para cobrir o solo e acelerar a restauração florestal. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 33 p
19	Artigo revisado por pares	Brasil	Camargo, J. L. C., Ferraz, I. D. K., & Imakawa, A. M. (2002). Rehabilitation of degraded areas of central Amazonia using direct sowing of forest tree seeds. <i>Restoration ecology</i> , 10(4), 636-644.
20	Dissertação de mestrado	Brasil	Carvalho, M. S. (2007). Avaliação do estabelecimento de espécies de Cerrado sentido restrito, a partir do plantio direto de sementes na recuperação de uma cascalheira na Fazenda Água Limpa-UnB. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 41 p
21	Artigo revisado por pares	Brasil	Carvalho, J. A., Vieira, M. R., Santos, V. L., & Santos, C. M. (2002). Eficácia do herbicida glyphosate no controle de <i>Brachiaria decumbens</i> na cultura da guariroba ( <i>Syagrus oleracea</i> ). <i>Revista Brasileira de Herbicidas</i> , 3(2-3), 123-126.
22	Dissertação de mestrado	Brasil	Castro, D. C. V. (2013). Semeadura direta de espécies arbustivas e de adubação verde como estratégia de sombreamento para restauração de áreas degradada. Dissertação de Mestrado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 94 p

23	Artigo revisado por pares	Brasil	Cava, M. G. B., Isernhagen, I., Mendonça, A. H., & Durigan, G. (2016). Comparação de técnicas para restauração da vegetação lenhosa de Cerrado em pastagens abandonadas. <i>Hoehnea</i> , 43, 301-315.
24	Artigo revisado por pares	Costa Rica	Cole, R. J., Holl, K. D., Keene, C. L., & Zahawi, R. A. (2011). Direct seeding of late-successional trees to restore tropical montane forest. <i>Forest Ecology and Management</i> , 261(10), 1590-1597.
25	Dissertação de mestrado	Brasil	Correia, M. R. M. (2021). Semeadura direta para restauração florestal e seus efeitos sobre comunidades de formigas e interações ecológicas. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Uberlândia. 100 p
26	Artigo revisado por pares	Brasil	Correia, M. R. M., Ferreira, M. C., Alves, M., Consolaro, H. N., & Vieira, D. L. M. (2022). Less is more: Little seed processing required for direct seeding in seasonal tropics. <i>New Forests</i> , 53(4), 695-719.
27	Artigo revisado por pares	Brasil	Damasco, G., & Corrêa, R. S. (2011). Germinação e desenvolvimento de duas espécies de cerrado semeadas em consórcio com <i>Solanum lycocarpum</i> A. St.-HIL. em uma cascalheira no Distrito Federal. <i>Estudos de Biologia</i> , 32(76/81).
28	Artigo revisado por pares	Brasil	Engel, V. L., & Parrotta, J. A. (2001). An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central Sao Paulo state, Brazil. <i>Forest Ecology and Management</i> , 152(1-3), 169-181.
29	Artigo revisado por pares	Brasil	Escaio, A. C., Corrêa, G. A. P., Lima, J. D. N., & Coelho, G. C. 2012. Emergency and growth of <i>Ateleia glazioveana</i> Baill. seedlings in direct sowing in an early secondary succession stage. <i>Brazilian Journal of Ecology</i> . 35-41.

30	Artigo revisado por pares	Brasil	Ferreira, M. C., Cordeiro, A. O.O., Sampaio, A. B., Schmidt, I. B., & Vieira, D. L. M. (2022). Direct seeding versus seedling planting: survival, biomass, growth, and cost up to 6 years for four tropical seasonal tree species. <i>Restoration Ecology</i> , 31(4), e13807.
31	Artigo revisado por pares	Brasil	Ferreira, R. A., Davide, A. C., Bearzoti, E., & Motta, M. S. (2007). Semeadura direta com espécies arbóreas para recuperação de ecossistemas florestais. <i>Cerne</i> , 13(3), 271-279.
32	Artigo revisado por pares	Brasil	Ferreira, R. A., Santos, P. L., Aragão, A. G., Santos, T. I. S., Santos Neto, E. M., & Rezende, A. M. S. (2009). Semeadura direta com espécies florestais na implantação de mata ciliar no Baixo São Francisco em Sergipe. <i>Scientia Forestalis</i> . 37(81), 37-46.
33	Artigo revisado por pares	Brasil	Figueiredo, M. A., Messias, M. C. T. B., Leite, M. G. P., & Kozovits, A. R. (2021). Direct seeding in the restoration of post-mined campo rupestre: Germination and establishment of 14 native species. <i>Flora</i> , 276, 151772.
34	Artigo revisado por pares	México	Garcia-Orth, X., & Martínez-Ramos, M. (2008). Seed dynamics of early and late successional tree species in tropical abandoned pastures: seed burial as a way of evading predation. <i>Restoration Ecology</i> , 16(3), 435-443.
35	Artigo revisado por pares	Costa Rica	Gerhardt, K. (1996). Germination and development of sown mahogany ( <i>Swietenia macrophylla</i> King) in secondary tropical dry forest habitats in Costa Rica. <i>Journal of Tropical Ecology</i> , 12(2), 275-289.

36	Artigo revisado por pares	Brasil	Giordani, I., Oliveira, A. D., & Kissmann, C. (2016). Protetor físico associado à semeadura direta de espécies vegetais nativas em área de Floresta Ombrófila Mista em processo de restauração. <i>Revista Acta Ambiental Catarinense</i> , 13(1), 1-11.
37	Artigo revisado por pares	Brasil	Gomes, T. O., Pereira, G. M., & Aguiar, O. J. R. (2021). Efeito da profundidade de semeadura na qualidade de mudas e no estabelecimento da janela de plantio de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby no sudeste paraense. <i>Research, Society and Development</i> , 10(9), e19110917990-e19110917990.
38	Dissertação de mestrado	Brasil	Griebeler, A. M. (2019). Estratégias para o enriquecimento de áreas ripárias em processo de restauração no extremo sul do bioma Mata Atlântica. Dissertação de Mestrado - Universidade de Federal de Santa Maria. 128 p
39	Artigo revisado por pares	Brasil	Guarino, E. S. G., & Scariot, A. (2014). Direct seeding of dry forest tree species in abandoned pastures: effects of grass canopy and seed burial on germination. <i>Ecological research</i> , 29(3), 473-482.
40	Artigo revisado por pares	Panamá	Hooper, E., Condit, R., & Legendre, P. (2002). Responses of 20 native tree species to reforestation strategies for abandoned farmland in Panama. <i>Ecological applications</i> , 12(6), 1626-1641.

41	Dissertação de mestrado	Brasil	Horle, D. C. (2021). Semeadura direta para restauração de floresta tropical: efeitos de arranjos de espécies no estabelecimento e crescimento inicial da comunidade arbórea. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos. 48 p
42	Artigo revisado por pares	Brasil	Hüller, A., Coelho, G. C., Meneghello, G. E., & Peske, S. T. (2017). Evaluation of direct seeding and seedling planting of two neotropical tree species with the use of natural inputs. <i>Revista Árvore</i> , 41(4), e410405.
43	Tese de doutorado	Brasil	Isernhagen, I. (2010). Uso de semeadura direta de espécies arbóreas nativas para restauração florestal de áreas agrícolas, sudeste do Brasil. Tese de Doutorado - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. 105 p
44	Artigo revisado por pares	Brasil	Jesus, J. B., Ferreira, R. A., Gama, D. C., & Goes, J. H. A. (2017). Estabelecimento de espécies florestais nativas via semeadura direta no rio Piauitinga-Sergipe. <i>Floresta e Ambiente</i> , 24, e20150288.
45	Artigo revisado por pares	México	Laborde, J., & Corrales-Ferrayola, I. (2012). Direct seeding of <i>Brosimum alicastrum</i> Sw.(Moraceae) and <i>Enterolobium cyclocarpum</i> (Jacq.) Griseb.(Mimosaceae) in different habitats in the dry tropics of central Veracruz. <i>Acta botánica mexicana</i> , (100), 107-134.



46	Artigo revisado por pares	Brasil	Lacerda, D. M. A., & Figueiredo, P. S. (2009). Restauração de matas ciliares do rio Mearim no município de Barra do Corda-MA: seleção de espécies e comparação de metodologias de reflorestamento. <i>Acta Amazonica</i> , 39(2), 295-303.
47	Dissertação de mestrado	Brasil	Le Bourlegat, J. M. G. (2020). Avaliação do efeito de diferentes micro-habitat no processo de restauração ecológica de Floresta Estacional Semidecidual. Capítulo 3. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 127 p
48	Artigo revisado por pares	Brasil	Le Bourlegat, J. M. G., Gandolfi, S., Brancalion, P. H. S., & Dias, C. T. D. S. (2013). Enriquecimento de floresta em restauração por meio de sementeira direta de lianas. <i>Hoehnea</i> , 40, 465-472.
49	Dissertação de mestrado	Brasil	Leão, B. M. (2019). Muvuca e bolas de sementes na restauração ecológica de áreas degradadas. Cap 2. Bolas de sementes na recuperação de área Degradada. (Dissertação, Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri).
50	Artigo revisado por pares	Brasil	Leão, B. M., Braga, M. A., Pereira, I. M., & Santos, G. C. (2023). Ecological restoration in pasture areas with direct seeding. <i>Ciência Florestal</i> , 32, 1928-1947.
51	Monografia	Brasil	Leite, J. B. (2017). Sementeira direta de 36 espécies nativas em área de pastagem abandonada no Distrito Federal. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. 33 p

52	Dissertação de mestrado	Brasil	Liaffa, A. B. S. (2020). Restauração ecológica no Cerrado: intenso preparo de solo e alta densidade de semeadura não eliminam a necessidade de erradicação de gramíneas exóticas invasoras. Capítulo 2. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 68 p
53	Tese de doutorado	Brasil	López, A. M. T. (2020). Potencial da semeadura direta em áreas de pastagens em Floresta Decidual do Estado de São Paulo. Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos. 71 p
54	Artigo revisado por pares	Brasil	Malavasi, U. C., Gasparino, D., & Malavasi, M. M. (2005). Semeadura direta na recomposição vegetal de áreas ciliares: efeitos da sazonalidade, uso do solo, exclusão da predação, e profundidade na sobrevivência inicial. <i>Semina: Ciências Agrárias</i> , 26(4), 449-454.
55	Artigo revisado por pares	Brasil	Malavasi, U. C., Klein, J., & Malavasi, M. M. (2010). Efeito de um protetor físico na semeadura direta de duas espécies florestais em área de domínio ciliar. <i>Revista Árvore</i> , 34(5), 781-787.
56	Artigo revisado por pares	Brasil	Mangueira, J. R. S., Holl, K. D., & Rodrigues, R. R. (2019). Enrichment planting to restore degraded tropical forest fragments in Brazil. <i>Ecosystems and People</i> , 15(1), 3-10.
57	Dissertação de mestrado	Brasil	Mariano, E. A. (2012). Semeadura direta de espécies florestais visando a restauração de áreas degradadas na Amazônia. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Lavras. 92 p
58	Artigo revisado por pares	Brasil	Mattei, V. L. (1995). Preparo de solo e uso de protetor físico, na implantação de <i>Cedrela fissilis</i> V. E <i>Pinus taeda</i> L., por semeadura direta. <i>Current Agricultural Science and Technology</i> , 1(3), 127-132.

59	Artigo revisado por pares	Brasil	Mattei, V. L., & Rosenthal, M. D. A. (2002). Semeadura direta de canafistula ( <i>Peltophorum dubium</i> (Spreng.) Taub. no enriquecimento de capoeiras. <i>Revista Árvore</i> , 26(6), 649-654.
60	Artigo revisado por pares	Brasil	Meli, P., Isernhagen, I., Brancalion, P. H., Isernhagen, E. C., Behling, M., & Rodrigues, R. R. (2018). Optimizing seeding density of fast-growing native trees for restoring the Brazilian Atlantic Forest. <i>Restoration Ecology</i> , 26(2), 212-219.
61	Artigo revisado por pares	Brasil	Meneghello, G. E., & Mattei, V. L. (2004). Semeadura direta de timbaúva ( <i>Enterolobium contortisiliquum</i> ), canafistula ( <i>Peltophorum dubium</i> ) e cedro ( <i>Cedrela fissilis</i> ) em campos abandonados. <i>Ciência Florestal</i> , 14(2), 21-27.
62	Monografia	Brasil	Miranda, E. (2021). Semeadura direta de espécies nativas em área declivosa no município de Paracambi-RJ. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 25 p
63	Dissertação de mestrado	Brasil	Moraes, M. R. J. (2013a). Efeitos da proteção e do envigoramento na germinação e estabelecimento de plântulas de duas espécies arbóreas visando a semeadura direta. Experimento 1. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 65 p
64	Dissertação de mestrado	Brasil	Moraes, M. R. J. (2013b). Efeitos da proteção e do envigoramento na germinação e estabelecimento de plântulas de duas espécies arbóreas visando a semeadura direta. Experimento 2. Dissertação de Mestrado - Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 65 p

65	Dissertação de mestrado	Brasil	Nahssen, M. H. C. (2018). Enriquecimento de uma floresta em restauração por meio da semeadura direta e introdução de plântulas. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 134 p
66	Artigo revisado por pares	México	Negreros-Castillo, P., Snook, L. K., & Mize, C. W. (2003). Regenerating mahogany ( <i>Swietenia macrophylla</i> ) from seed in Quintana Roo, Mexico: the effects of sowing method and clearing treatment. <i>Forest Ecology and Management</i> , 183(1), 351-362.
67	Dissertação de mestrado	Brasil	Oliveira, A. S. (2013). Semeadura direta e plantio de mudas para recuperação de nascentes no rio Piauitinga-SE. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Sergipe. 58 p
68	Monografia	Brasil	Oliveira, M. N. D. (2011). Avaliação da capacidade de emergência de oito espécies de árvores do cerrado, milho, feijão-de-porco e plantas espontâneas sob diferentes quantidades de palhada de brachiaria. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. 39 p
69	Dissertação de mestrado	Brasil	Paiva, J. B. (2020). Germinação de sementes de espécies florestais nativas de recobrimento utilizando a técnica de peletização em diferentes profundidades de semeadura. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo. 108 p
70	Artigo revisado por pares	Brasil	Passaretti, R. A., Pilon, N. A., & Durigan, G. (2020). Weed control, large seeds and deep roots: Drivers of success in direct seeding for savanna restoration. <i>Applied Vegetation Science</i> , 23, 406-416.

71	Dissertação de mestrado	Brasil	Paumgarten, A. E. A. (2018). Restauração ecológica de mata ciliar dominada por pastagem no nordeste do Pará, Brasil. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal Rural da Amazônia. 48 p
72	Artigo revisado por pares	Brasil	Pellizzaro, K.F., Cordeiro, A.O., Alves, M., Motta, C.P., Rezende, G.M., Silva, R.R., Ribeiro, J.F., Sampaio, A.B., Vieira, D.L., & Schmidt, I.B. (2017). “Cerrado” restoration by direct seeding: field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. <i>Brazilian Journal of Botany</i> , 40(3), 681-693.
73	Artigo revisado por pares	Brasil	Pereira, S. R., Laura, V. A., & Souza, A. L. T. (2013a). Establishment of Fabaceae tree species in a tropical pasture: influence of seed size and weeding methods. <i>Restoration Ecology</i> , 21(1), 67-74.
74	Artigo revisado por pares	Brasil	Pereira, S. R., Laura, V. A., & Souza, A. L. T. (2013b). Superação de dormência de sementes como estratégia para restauração florestal de pastagem tropical. <i>Pesquisa Agropecuária Brasileira</i> , 48(2), 148-156.
75	Artigo revisado por pares	Brasil	Piaia, B. B., Rovedder, A. P. M., Giacomini, I. F., Felker, R. M., de Moraes Stefanello, M., Hummel, R. B., & Schenato, R. B. (2023). DIRECT SEEDING FOR FOREST RESTORATION IN SOUTHERN BRAZIL: INFLUENCE OF SOIL CONDITIONS AND SUBTROPICAL CLIMATE. <i>Revista Acta Ambiental Catarinense</i> , 20(1), 01-12.

76	Dissertação de mestrado	Brasil	Pierry, R. B. (2017). Atributos das sementes e germinação de espécies arbóreas: perspectivas para restauração ecológica. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 55 p
77	Artigo revisado por pares	Brasil	Pietro-Souza, W., & Silva, N. M. (2014). Plantio manual de muvuca de sementes no contexto da restauração ecológica de áreas de preservação permanente degradadas. <i>Revista Brasileira de Agroecologia</i> , 9(3), 63-74.
78	Artigo revisado por pares	Brasil	Piotrowski, I., Paladines, H. M., de Almeida, L. S., López, A. M. T., Dutra, F. B., Francisco, B. S., Silva, J.M.S., & Piña-Rodrigues, F. C. M. (2023). Seeds' Early Traits as Predictors of Performance in Direct Seeding Restoration. <i>Forests</i> , 14(3), 547.
79	Artigo revisado por pares	México	Prieto-Rodao, E., Ricker, M., & Siebe, C. (2019). A cost–benefit evaluation of direct seeding with and without protector for two native tree species in a tropical rainforest. <i>Restoration Ecology</i> , 27(2), 247-253.
80	Artigo revisado por pares	Brasil	Queiroz, S. E., Pelosi, A. P., Silva, M., Silva, L., & Júnior, A. P. (2013). Efeito do protetor físico na semeadura direta sobre o crescimento de quatro espécies arbóreas. <i>Enciclopédia Biosfera</i> , 9(17), 1192-1201.
81	Monografia	Brasil	Radel, D. (2014). Semeadura direta manual de espécies nativas do Cerrado em área de reserva legal na Fazenda Entre Rios, Paranoá-DF. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. 24 p

82	Artigo revisado por pares	Ilhas Virgens	Ray, G. J., & Brown, B. J. (1995). Restoring Caribbean dry forests: evaluation of tree propagation techniques. <i>Restoration ecology</i> , 3(2), 86-94.
83	Artigo revisado por pares	Brasil	Resende, L. A., & Pinto, L. V. A. (2013). Emergência e desenvolvimento de espécies nativas em área degradada por disposição de resíduos sólidos urbanos. <i>Revista Agrogeoambiental</i> , 5(1), 37-47.
84	Monografia	Brasil	Ribeiro, J. S. (2017). Semeadura direta para a restauração de área de cultivo abandonado no cerrado: efeito da profundidade do sulco e adubação. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. 32 p
85	Capítulo de livro	Brasil	Rolim, S. G., Jesus, R. M., & Nascimento, H. E. M. (2007). Restauração experimental de uma pastagem na mata atlântica através de semeadura direta. <i>Ecosystemas Costeiros do Espírito Santo, EDUFES, Espírito Santo</i> , 269-290.
86	Artigo revisado por pares	Brasil	Sampaio, A. B., Holl, K. D., & Scariot, A. (2007). Does restoration enhance regeneration of seasonal deciduous forests in pastures in central Brazil?. <i>Restoration ecology</i> , 15(3), 462-471.
87	Artigo revisado por pares	Brasil	Santos Júnior, N. A., Botelho, S. A., & Davide, A. C. (2004). Estudo da germinação e sobrevivência de espécies arbóreas em sistema de semeadura direta, visando à recomposição de mata ciliar. <i>Cerne</i> , 10(1), 103-117.

88	Dissertação de mestrado	Brasil	Santos, A. B. P. (2020). Avaliação da eficiência do plantio direto associado ao controle químico como método de restauração de fitofisionomias savânicas do Cerrado. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 41 p
89	Dissertação de mestrado	Brasil	Santos, L. C. A. (2010). A eficiência da semeadura direta para a revegetação de uma jazida de cascalho na fazenda Água Limpa, APA Gama Cabeça de Veado, Brasília, DF. Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. 106 p
90	Artigo revisado por pares	Brasil	Santos, P. L., Ferreira, R. A., Aragão, A. G., Amaral, L. A., & Oliveira, A. S. (2012). Estabelecimento de espécies florestais nativas por meio de semeadura direta para recuperação de áreas degradadas. <i>Revista Árvore</i> , 36 (2), 237-245.
91	Artigo revisado por pares	Brasil	Scaloppi, J. C., & Souza, A. L. T. (2020). Simultaneous effects of reintroduction strategy and seed size on the initial development of two tropical tree species in an abandoned eucalyptus plantation. <i>Australian Journal of Botany</i> , 68(6), 439-448.
92	Artigo revisado por pares	Brasil	Schneider, P. R., Finger, C. A. G., & Schneider, P. S. P. (1999). Implantação de povoamentos de <i>Dodonaea viscosa</i> (L.) Jacq. com mudas e semeadura direta. <i>Ciência Florestal</i> , 9(1), 29-33.



93	Artigo revisado por pares	Brasil	Silva, A. C., Silva, M. P. P., Zamith, R., Galetti, G., & Piña-Rodrigues, F. C. M. (2020). Osmotic treatment, growth regulator and rooter in <i>Tabebuia roseoalba</i> (RIDL.) Sandwith seeds for direct sowing. <i>Journal of Seed Science</i> , 42, 1-8.
94	Artigo revisado por pares	Brasil	Silva, K. A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., & Campos, W. H. (2015). Semeadura direta com transposição de serapilheira como metodologia de restauração ecológica. <i>Revista Árvore</i> , 39(5), 811-820.
95	Artigo revisado por pares	Brasil	Silva, K. F., Borges, L., Oliveira, J. N., Mota, E. E. S., & Fernandes, D. (2020). Desenvolvimento inicial de mamacadeira implantada por sementeira direta e mudas. <i>Brazilian Journal of Development</i> , 6(1), 2159-2168.
96	Artigo revisado por pares	Brasil	Silva, R. R., & Vieira, D. L. (2017). Direct seeding of 16 Brazilian savanna trees: responses to seed burial, mulching and an invasive grass. <i>Applied Vegetation Science</i> , 20(3), 410-421.
97	Artigo revisado por pares	Brasil	Silva, R. R., Oliveira, D. R., Rocha, G. P., & Vieira, D. L. (2015). Direct seeding of Brazilian savanna trees: effects of plant cover and fertilization on seedling establishment and growth. <i>Restoration Ecology</i> , 23(4), 393-401.
98	Dissertação de mestrado	Brasil	Silva, T. D. (2019). Aceleração do processo de restauração de florestas tropicais através do uso de cobertura transitória ou poda. <i>Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo</i> . 86 p

99	Tese de doutorado	Brasil	Silveira, L. P. D. (2020). Recuperação de uma área de depósito de resíduos sólidos em Diamantina, MG. (Tese, Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri).
100	Artigo revisado por pares	Brasil	Siqueira, F. F., & Pinto, L. V. A. (2009). Semeadura direta de candeia ( <i>Eremanthus erythropappus</i> ) sob diferentes adubações em Inconfidentes. <i>Revista Agrogeoambiental</i> .
101	Artigo revisado por pares	Brasil	Soares, P. G., & Rodrigues, R. R. (2008). Semeadura direta de leguminosas florestais: efeito da inoculação com rizóbio na emergência de plântulas e crescimento inicial no campo. <i>Scientia Forestalis</i> , 36(78), 115-121.
102	Artigo revisado por pares	Brasil	Souza, D. C., & Engel, V. L. (2018). Direct seeding reduces costs, but it is not promising for restoring tropical seasonal forests. <i>Ecological Engineering</i> , 116, 35-44.
103	Artigo revisado por pares	Brasil	Souza, D. C., Engel, V. L., & Mattos, E. C. (2021). Direct seeding to restore tropical seasonal forests: effects of green manure and hydrogel amendment on tree species performances and weed infestation. <i>Restoration Ecology</i> , 29(1), e13277.
104	Artigo revisado por pares	Brasil	Souza, M. F., Martins, E. R., Fernandes, L. A., & Nere, P. S. (2016). Emergência e desenvolvimento inicial de sementes de <i>Dimorphandra mollis</i> Benth. em campo. <i>Revista Brasileira de Plantas Mediciniais</i> , 18(1), 186-190.

105	Dissertação de mestrado	Brasil	Souza, R. P. (2013). Semeadura direta de espécies florestais nativas, como alternativa de restauração ecológica para a região de Dourados, Mato Grosso do Sul. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Grande Dourados. 34 p
106	Artigo revisado por pares	Brasil	Suganuma, M. S., Araújo Barbosa, C. E., Cavalheiro, A. L., & Torezan, J. M. D. (2008). Enriquecimento artificial da diversidade de espécies em reflorestamentos: análise preliminar de dois métodos, transferência de serapilheira e semeadura direta. <i>Acta Scientiarum. Biological Sciences</i> , 30(2), 151-158.
107	Dissertação de mestrado	Brasil	Timóteo, A. N. (2021). Recrutamento de espécies nativas via semeadura direta no Cerrado. (Dissertação, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul).
108	Dissertação de mestrado	Brasil	Tomaz, D. J. (2017). Influência da massa de semente e da fertilidade do solo no desempenho de espécies arbóreas em restauração de área ripária. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de São Carlos. 43 p
109	Artigo revisado por pares	Brasil	Vieira, D. L. M., & Scariot, A. (2006). Effects of logging, liana tangles and pasture on seed fate of dry forest tree species in Central Brazil. <i>Forest Ecology and Management</i> , 230, 197-205.

110	Dados não publicados com metadados disponíveis (Table S2)	Brasil	<p>Vieira, D. L. M. 2011. Semeadura direta de árvores do Cerrado. Banco de dados do Laboratório de Ecologia e Conservação da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia. Descrição dos métodos: O trabalho foi realizado na Fazenda Sucupira, pertencente à Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, localizada a sudoeste da cidade de Brasília-DF (15°52'-15°56'S e 48°00'-48°02'W), com altitudes que variam de 1.050 a 1.250 m (OLIVEIRA et al., 2011). De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é o Aw (tropical chuvoso), caracterizado por duas estações bem definidas, verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual é de 1.578 mm e a temperatura média anual é de 21°C. O solo na área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho-Escuro. A vegetação original era cerrado stricto sensu (cerrado denso). A Fazenda possui uma área total de 1.763 ha e a área de estudo abrange cerca de 9 ha. Nesta área, durante anos houve monocultivo de soja.</p> <p>Desenho experimental: O desenho experimental foi de blocos ao acaso, com cinco blocos, cada um contendo seis linhas de plantio. Cada linha teve 30 m de comprimento, com distância de 5 m entre linhas e aproximadamente 100 m entre blocos.</p> <p>Implantação do experimento: O experimento foi implantado no início da estação chuvosa, dos dias 14 a 18 de novembro de 2011. As atividades de preparo do solo foram mecanizadas, o solo foi gradeado em faixas de um metro e a marcação da linha principal de cada tratamento foi feita com subsolador de 40 cm de profundidade no centro da área gradeada. Todas as linhas foram enleiradas com palhada, para evitar a emergência de plantas espontâneas e manter a umidade do solo. As sementes das 16 espécies arbóreas nativas foram distribuídas na linha, na quantidade de uma semente de cada espécie a cada dois metros, total de 90 sementes por espécie em cada bloco. A semente foi depositada em uma profundidade de 3 cm e</p>
-----	---	--------	---

			<p>coberta com solo. Essas sementes foram beneficiadas, porém não passaram por nenhum tratamento de quebra de dormência. Foi executada uma roçada mecânica nas entrelinhas ao final da estação chuvosa, maio de 2012. Foram avaliadas a emergência e sobrevivência das plântulas a cada dois meses após a semeadura até os 12 meses. A maioria das espécies foi germinada em laboratório.</p>
111	Dados não publicados com metadados disponíveis (Table S3)	Brasil	<p>Ferreira M. C., &amp; Vieira, D. L. M. (2021). Pioneiras e secundárias iniciais precisam de quebra de dormência na semeadura direta? Banco de dados do Laboratório de Ecologia e Conservação da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia.</p> <p>Descrição dos métodos: O trabalho foi realizado no campo experimental da Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, Brasília-DF (15° 43' 50.81"S, 47° 54' 10.09"W), com altitude 1.012 m. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima da região é o Aw (tropical chuvoso), caracterizado por duas estações bem definidas, verões chuvosos e invernos secos. A precipitação média anual é de 1.443 mm e a temperatura média anual é de 21°C. O solo na área de estudo é classificado como Latossolo Vermelho-Escuro. A vegetação original era Floresta Estacional Semidecidual. A área foi usada para experimentos de agricultura por muitos anos. Ela estava sem uso faziam dois anos. A <i>gramínea Megathyrsus maximus</i> cobria o solo da área.</p> <p>Desenho experimental: O desenho experimental foi de blocos ao acaso, com 10 blocos, cada um com 1 x</p>

1 m, contendo 10 linhas de plantio. Cada linha teve 1 m de comprimento x 0.5 cm de profundidade, com distância de 10 cm entre linhas. A posição das espécies foi sorteada em cada parcela. Cada espécie foi semeada em duas linhas, uma linha teve a dormência superada e a outra linha ficou como controle. Os tratamentos de superação da dormência foram imersão em água quente a 90°C por 10 min para *Apeiba tibourbou*, perfuração com pirografo para *Enterolobium timbouva*, imersão em água quente a 90°C por 1 min para *Guazuma ulmifolia*, imersão em água quente a 100°C por 5 min para *Mimosa densa* e imersão em ácido sulfúrico 1h á 15 min para *Senna alata*. A mucilagem produzida pela semente de *Guazuma ulmifolia* não foi removida. As espécies *Apeiba tibourbou*, *Guazuma ulmifolia*, *Mimosa densa* e *Senna alata* foram semeadas com 20 sementes por linha e *Enterolobium timbouva* que tem sementes maiores foi semeada com 10 sementes por linha. Assim, cada espécie teve 20 ou 10 sementes por tratamento e por parcela. Os tratamentos foram repetidos em laboratório para cada espécie, para aferir a germinabilidade do lote semeado em campo.

Implantação do experimento: O experimento foi implantado no início da estação chuvosa em 20/11/2021. As atividades de preparo do solo foram mecanizadas, o solo foi gradeado uma vez. No dia do plantio a área foi capinada com enxada e os sulcos foram feitos com minienxada (Sacho Coração). A plantas daninhas e invasoras foram removidas três vezes até o sexto mês. A emergência (plantas emergidas/semente) e estabelecimento (plantas emergidas vivas/semente) foi avaliada a cada 15 dias até o sexto mês.

## Referências bibliográficas da tese

- AIRES, S.S., SATO, M.N. & MIRANDA, H.S. (2014) Seed characterization and direct sowing of native grass species as a management tool. *Grass and Forage Science* **69**, 470–478.
- ALBUQUERQUE, N.C.B., MORAES, C.E., SOUZA, M.R., BARROS, R.L.C., ALVES, K.A. & PIERUZZI, F.P. (2022) *Sementes florestais da Mata Atlântica: um guia para o manejo de espécies da Hileia Baiana*. Programa Arboretum de Conservação e Restauração da Diversidade Florestal, Teixeira de Freitas-BA.
- ARAGÃO, J.S., ELIAS, F., NEVES, E.C. & GUILHERME, F.A.G. (2023) Forest recovery by direct seeding on the southern edge of the Brazilian Amazon. *Restoration Ecology* **31**, e14036.
- ASQUITH, N.M., WRIGHT, S.J. & CLAUSS, M.J. (1997) Does Mammal Community Composition Control Recruitment in Neotropical Forests? Evidence from Panama. *Ecology* **78**, 941–946.
- ATONDO-BUENO, E.J., BONILLA-MOHENO, M. & LÓPEZ-BARRERA, F. (2018) Cost-efficiency analysis of seedling introduction vs. direct seeding of *Oreomunnea mexicana* for secondary forest enrichment. *Forest Ecology and Management* **409**, 399–406.
- BALANDIER, P., FROCHOT, H. & SOURISSEAU, A. (2009) Improvement of direct tree seeding with cover crops in afforestation: Microclimate and resource availability induced by vegetation composition. *Forest Ecology and Management* **257**, 1716–1724.
- BARALOTO, C., FORGET, P.-M. & GOLDBERG, D.E. (2005) Seed mass, seedling size and neotropical tree seedling establishment. *Journal of Ecology* **93**, 1156–1166.
- BARBEDO, C.J. & SANTOS JÚNIOR, N.A. (2018) *Sementes do Brasil: produção e tecnologia para espécies da flora brasileira*. Instituto de Botânica, São Paulo.
- BASKIN, C.C. & BASKIN, J.M. (2014) *Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Elsevier Sciences, San Diego.
- BASKIN, C.C. & BASKIN, J.M. (2020) Breaking seed dormancy during dry storage: A useful tool or major problem for successful restoration via direct seeding? *Plants* **9**, 636. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- BASKIN, J.M. & BASKIN, C.C. (2004) A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research* **14**, 1–16. Cambridge University Press.
- BOND, W.J., HONIG, M. & MAZE, K.E. (1999) Seed size and seedling emergence: an allometric relationship and some ecological implications. *Oecologia* **120**, 132–136.
- BONILLA-MOHENO, M. & HOLL, K.D. (2010) Direct Seeding to Restore Tropical Mature-Forest Species in Areas of Slash-and-Burn Agriculture. *Restoration Ecology* **18**, 438–445.
- BORGHETTI, F., DE ANDRADE, L.A.Z., SCHMIDT, I.B. & BARBOSA, E.R.M. (2019) Seed germination and seedling recruitment of *Dimorphandra mollis* Benth. in a Neotropical savanna subjected to prescribed fires. *Folia Geobotanica* **54**, 43–51.
- BRASIL (2017) *Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa*. Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação, Brasília, DF.
- BUSTAMANTE, M.M.C., SILVA, J.S., SCARIOT, A., SAMPAIO, A.B., MASCIA, D.L., GARCIA, E., SANO, E., FERNANDES, G.W., DURIGAN, G., ROITMAN, I., FIGUEIREDO, I., RODRIGUES, R.R., PILLAR, V.D., DE OLIVEIRA, A.O., MALHADO, A.C., ET AL. (2019) Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **24**, 1249–1270.

- CAMARGO, J.L.C., FERRAZ, I.D.K. & IMAKAWA, A.M. (2002) Rehabilitation of Degraded Areas of Central Amazonia Using Direct Sowing of Forest Tree Seeds. *Restoration Ecology* **10**, 636–644.
- CAMINHOS DA SEMENTE (2024) A Iniciativa Caminhos da Semente visa dar escala à restauração ecológica no Brasil por meio do método de semeadura direta.
- CAMPOE, O.C., IANNELLI, C., STAPE, J.L., COOK, R.L., MENDES, J.C.T. & VIVIAN, R. (2014) Atlantic forest tree species responses to silvicultural practices in a degraded pasture restoration plantation: From leaf physiology to survival and initial growth. *Forest Ecology and Management* **313**, 233–242.
- CAMPOS-FILHO, E.M., COSTA, J.N.M.N., SOUSA, O.L. & JUNQUEIRA, R.G.P. (2013) Mechanized Direct-Seeding of Native Forests in Xingu, Central Brazil. *Journal of Sustainable Forestry* **32**, 702–727. Taylor & Francis.
- CAVA, M.G. DE B., ISERNHAGEN, I., MENDONÇA, A.H. DE & DURIGAN, G. (2016) Comparação de técnicas para restauração da vegetação lenhosa de Cerrado em pastagens abandonadas. *Hoehnea* **43**, 301–315. Instituto de Pesquisas Ambientais.
- CECCON, E., GONZÁLEZ, E.J. & MARTORELL, C. (2016) Is Direct Seeding a Biologically Viable Strategy for Restoring Forest Ecosystems? Evidences from a Meta-analysis. *Land Degradation & Development* **27**, 511–520.
- CHAMBERS, J.C. (1989) Seed viability of alpine species: variability within and among years. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives* **42**, 304–308.
- CHAZDON, R.L. (2008) Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. *Science* **320**, 1458–1460. American Association for the Advancement of Science.
- COLE, R.J., HOLL, K.D., KEENE, C.L. & ZAHAWI, R.A. (2011) Direct seeding of late-successional trees to restore tropical montane forest. *Forest Ecology and Management* **261**, 1590–1597.
- CONSOLARO, H., ALVES, M., FERREIRA, M.C. & VIEIRA, D.L.M. (2019) *Sementes, plântulas e restauração no sudeste goiano*. Athalaia, Brasília, DF.
- COOMES, D.A. & GRUBB, P.J. (2003) Colonization, tolerance, competition and seed-size variation within functional groups. *Trends in Ecology & Evolution* **18**, 283–291.
- CORNELISSEN, J.H.C., DIEZ, P.C. & HUNT, R. (1996) Seedling growth, allocation and leaf attributes in a wide range of woody plant species and types. *Journal of Ecology* **84**, 755–765. [Wiley, British Ecological Society].
- CORREIA, M.R. DE M., FERREIRA, M.C., ALVES, M., CONSOLARO, H.N. & VIEIRA, D.L.M. (2022) Less is more: Little seed processing required for direct seeding in seasonal tropics. *New Forests* **53**, 695–719.
- CORTÉS-FLORES, J., CORNEJO-TENORIO, G., SÁNCHEZ-CORONADO, M.E., OROZCO-SEGOVIA, A. & IBARRA-MANRÍQUEZ, G. (2020) Disentangling the influence of ecological and historical factors on seed germination and seedling types in a Neotropical dry forest. *PLOS ONE* **15**, e0231526. Public Library of Science.
- CROUZEILLES, R., FERREIRA, M.S., CHAZDON, R.L., LINDENMAYER, D.B., SANSEVERO, J.B.B., MONTEIRO, L., IRIBARREM, A., LATAWIEC, A.E. & STRASSBURG, B.B.N. (2017) Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Science Advances* **3**, e1701345. American Association for the Advancement of Science.
- DALLING, J.W. & HARMS, K.E. (1999) Damage tolerance and cotyledonary resource use in the tropical tree *Gustavia superba*. *Oikos* **85**, 257–264. [Nordic Society Oikos, Wiley].
- DALLING, J.W., HUBBELL, S.P. & SILVERA, K. (1998) Seed dispersal, seedling establishment and gap partitioning among tropical pioneer trees. *Journal of Ecology* **86**, 674–689.



- DAWS, M.I., CRABTREE, L.M., DALLING, J.W., MULLINS, C.E. & BURSLEM, D.F.R.P. (2008) Germination responses to water potential in neotropical pioneers suggest large-seeded species take more risks. *Annals of Botany* **102**, 945–951.
- DAWS, M.I., GARWOOD, N.C. & PRITCHARD, H.W. (2005) Traits of recalcitrant seeds in a semi-deciduous tropical forest in Panamá: Some ecological implications. *Functional Ecology* **19**, 874–885. [British Ecological Society, Wiley].
- DAYRELL, R.L.C., GARCIA, Q.S., NEGREIROS, D., BASKIN, C.C., BASKIN, J.M. & SILVEIRA, F.A.O. (2017) Phylogeny strongly drives seed dormancy and quality in a climatically buffered hotspot for plant endemism. *Annals of Botany* **119**, 267–277.
- DECHOUM, M. DE S., SAMPAIO, A.B., ZILLER, S.R. & ZENNI, R.D. (2018) Invasive species and the Global Strategy for Plant Conservation: how close has Brazil come to achieving Target 10? *Rodriguésia* **69**, 1567–1576. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro.
- DONOHUE, K., RUBIO DE CASAS, R., BURGHARDT, L., KOVACH, K. & WILLIS, C.G. (2010) Germination, postgermination adaptation, and species ecological ranges. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* **41**, 293–319.
- DOUST, S.J., ERSKINE, P.D. & LAMB, D. (2006) Direct seeding to restore rainforest species: Microsite effects on the early establishment and growth of rainforest tree seedlings on degraded land in the wet tropics of Australia. *Forest Ecology and Management* **234**, 333–343.
- DOUST, S.J., ERSKINE, P.D. & LAMB, D. (2008) Restoring rainforest species by direct seeding: Tree seedling establishment and growth performance on degraded land in the wet tropics of Australia. *Forest Ecology and Management* **256**, 1178–1188.
- ENGEL, V.L. & PARROTTA, J.A. (2001) An evaluation of direct seeding for reforestation of degraded lands in central São Paulo state, Brazil. *Forest Ecology and Management* **152**, 169–181.
- ESCOBAR, D.F.E., SILVEIRA, F.A.O. & MORELLATO, L.P.C. (2018) Timing of seed dispersal and seed dormancy in Brazilian savanna: two solutions to face seasonality. *Annals of Botany* **121**, 1197–1209.
- FAGUNDES, N.C.A., BRAGA, L. DE L., SILVA, W.A., COUTINHO, C.A., NEVES, W.V., SOUZA, R.A., VELOSO, M. DAS D.M. & NUNES, Y.R.F. (2018) Survival of Saplings in Recovery of Riparian Vegetation of Pandeiros River (MG). *Floresta e Ambiente* **25**. Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.
- FERREIRA, M.C., CORDEIRO, A.O. DE O., SAMPAIO, A.B., SCHMIDT, I.B. & VIEIRA, D.L.M. (2023) Direct seeding versus seedling planting: survival, biomass, growth, and cost up to 6 years for four tropical seasonal tree species. *Restoration Ecology* **31**, e13807.
- FERREIRA, M.C. & VIEIRA, D.L.M. (2017) Topsoil for restoration: Resprouting of root fragments and germination of pioneers trigger tropical dry forest regeneration. *Ecological Engineering* **103**, 1–12.
- FIGUEIREDO, M.A., MESSIAS, M.C.T.B., LEITE, M.G.P. & KOZOVITS, A.R. (2021) Direct seeding in the restoration of post-mined campo rupestre: Germination and establishment of 14 native species. *Flora* **276–277**, 151772.
- FINEGAN, B. (1996) Pattern and process in neotropical secondary rain forests: the first 100 years of succession. *Trends in Ecology & Evolution* **11**, 119–124.
- FREITAS, M.G., RODRIGUES, S.B., CAMPOS-FILHO, E.M., CARMO, G.H.P., VEIGA, J.M., JUNQUEIRA, R.G.P. & VIEIRA, D.L.M. (2019) Evaluating the success of direct seeding for tropical forest restoration over ten years. *Forest Ecology and Management* **438**, 224–232.

- FRISCHIE, S., MILLER, A.L., PEDRINI, S. & KILDISHEVA, O.A. (2020) Ensuring seed quality in ecological restoration: native seed cleaning and testing. *Restoration Ecology* **28**, S239–S248.
- GARWOOD, N.C. (1983) Seed Germination in a Seasonal Tropical Forest in Panama: A Community Study. *Ecological Monographs* **53**, 159–181.
- GREEN, P.T. & JUNIPER, P.A. (2004) Seed–seedling allometry in tropical rain forest trees: seed mass-related patterns of resource allocation and the ‘reserve effect’. *Journal of Ecology* **92**, 397–408.
- GREET, J., EDE, F., ROBERTSON, D. & MCKENDRICK, S. (2020) Should I plant or should I sow? Restoration outcomes compared across seven riparian revegetation projects. *Ecological Management & Restoration* **21**, 58–65.
- GRIME, J.P. (2006) *Plant Strategies, Vegetation Processes, and Ecosystem Properties*. John Wiley & Sons.
- GROSSNICKLE, S.C. & IVETIĆ, V. (2017) Direct Seeding in Reforestation – A Field Performance Review. *REFORESTA* **4**, 94–142.
- GUZMAN-GRAJALES, S.M. & WALKER, L.R. (1991) Differential seedling responses to litter after hurricane Hugo in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico. *Biotropica* **23**, 407–413. [Association for Tropical Biology and Conservation, Wiley].
- HARMS, K.E. & DALLING, J.W. (1997) Damage and herbivory tolerance through resprouting as an advantage of large seed size in tropical trees and lianas. *Journal of Tropical Ecology* **13**, 617–621. Cambridge University Press.
- HEWITT, N. (1998) Seed size and shade-tolerance: a comparative analysis of North American temperate trees. *Oecologia* **114**, 432–440.
- HINKSON, K.M., NESMITH, J.E., ALBA, C., DURHAM, M., FERRELL, J. & FLORY, S.L. (2024) Selective method for invasive plant removal enhances restoration. *Restoration Ecology* **n/a**, e14112.
- HOFFMANN, W.A., ORTHEN, B. & FRANCO, A.C. (2004) Constraints to seedling success of savanna and forest trees across the savanna-forest boundary. *Oecologia* **140**, 252–260.
- HOLL, K.D. (1999) Factors Limiting Tropical Rain Forest Regeneration in Abandoned Pasture: Seed Rain, Seed Germination, Microclimate, and Soil. *Biotropica* **31**, 229–242.
- HOLL, K.D. (2002) Effect of Shrubs on Tree Seedling Establishment in an Abandoned Tropical Pasture. *Journal of Ecology* **90**, 179–187. [Wiley, British Ecological Society].
- HOLL, K.D. & AIDE, T.M. (2011) When and where to actively restore ecosystems? *Forest Ecology and Management* **261**, 1558–1563.
- HOLL, K.D., LOIK, M.E., LIN, E.H.V. & SAMUELS, I.A. (2000) Tropical Montane Forest Restoration in Costa Rica: Overcoming Barriers to Dispersal and Establishment. *Restoration Ecology* **8**, 339–349.
- HOLL, K.D., REID, J.L., CHAVES-FALLAS, J.M., OVIEDO-BRENES, F. & ZAHAWI, R.A. (2017) Local tropical forest restoration strategies affect tree recruitment more strongly than does landscape forest cover. *Journal of Applied Ecology* **54**, 1091–1099.
- HONEK, A., MARTINKOVA, Z. & SASKA, P. (2005) Post-dispersal predation of *Taraxacum officinale* (dandelion) seed. *Journal of Ecology* **93**, 345–352.
- HONG, T.D. & ELLIS, R.H. (1996) *A Protocol to Determine Seed Storage Behaviour*. Bioersivity International.
- HOOPER, E., CONDIT, R. & LEGENDRE, P. (2002) Responses of 20 Native Tree Species to Reforestation Strategies for Abandoned Farmland in Panama. *Ecological Applications* **12**, 1626–1641.

- JIMÉNEZ-ALFARO, B., SILVEIRA, F.A.O., FIDELIS, A., POSCHLOD, P. & COMMANDER, L.E. (2016) Seed germination traits can contribute better to plant community ecology. *Journal of Vegetation Science* **27**, 637–645.
- JURADO, E. & WESTOBY, M. (1992) Seedling growth in relation to seed size among species of arid Australia. *Journal of Ecology* **80**, 407–416. [Wiley, British Ecological Society].
- KHURANA, E. & SINGH, J.S. (2001) Ecology of seed and seedling growth for conservation and restoration of tropical dry forest : a review. *Environmental Conservation* **28**, 39–52. Cambridge University Press.
- KILDISHEVA, O.A., DIXON, K.W., SILVEIRA, F.A.O., CHAPMAN, T., DI SACCO, A., MONDONI, A., TURNER, S.R. & CROSS, A.T. (2020) Dormancy and germination: making every seed count in restoration. *Restoration Ecology* **28**, S256–S265.
- KITAJIMA, K. (1992) Relationship between Photosynthesis and Thickness of Cotyledons for Tropical Tree Species. *Functional Ecology* **6**, 582–589. [British Ecological Society, Wiley].
- KITAJIMA, K. (2003) Impact of Cotyledon and Leaf Removal on Seedling Survival in Three Tree Species with Contrasting Cotyledon Functions. *Biotropica* **35**, 429–434.
- KUMAR, R., MAHAJAN, G., SRIVASTAVA, DR.S. & SINHA, A. (2014) Green manuring: A boon for sustainable agriculture and pest management – A review. *Agricultural Reviews* **35**, 196–206.
- LABORDE, J. & CORRALES-FERRAYOLA, I. (2012) Direct seeding of *Brosimum alicastrum* Sw. (Moraceae) and *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. (Mimosaceae) in different habitats in the dry tropics of central Veracruz. *Acta botánica mexicana*, 107–134. Instituto de Ecología A.C., Centro Regional del Bajío.
- LARSON, J.E. & FUNK, J.L. (2016) Regeneration: an overlooked aspect of trait-based plant community assembly models. *Journal of Ecology* **104**, 1284–1298.
- LARSON, J.E., SHELEY, R.L., HARDEGREE, S.P., DOESCHER, P.S. & JAMES, J.J. (2015) Seed and seedling traits affecting critical life stage transitions and recruitment outcomes in dryland grasses. *Journal of Applied Ecology* **52**, 199–209.
- LATAWIEC, A.E., STRASSBURG, B.B., BRANCALION, P.H., RODRIGUES, R.R. & GARDNER, T. (2015) Creating space for large-scale restoration in tropical agricultural landscapes. *Frontiers in Ecology and the Environment* **13**, 211–218.
- LAUMANN, P.D., FERREIRA, M.C., SILVA, D.A. & VIEIRA, D.L.M. (2023) Germination traits explain the success of direct seeding restoration in the seasonal tropics of Brazil. *Forest Ecology and Management* **529**, 120706.
- LEISHMAN, M., WRIGHT, I., MOLES, A. & WESTOBY, M. (2000) The Evolutionary Ecology of Seed Size. *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities* **2**, 31–57.
- LIMA, V.V.F., VIEIRA, D.L.M., SEVILHA, A.C. & SALOMÃO, A.N. (2008) Germinação de espécies arbóreas de floresta estacional decidual do vale do rio Paranã em Goiás após três tipos de armazenamento por até 15 meses. *Biota Neotropica* **8**, 89–97. Instituto Virtual da Biodiversidade | BIOTA - FAPESP.
- LÖF, M., CASTRO, J., ENGMAN, M., LEVERKUS, A.B., MADSEN, P., REQUE, J.A., VILLALOBOS, A. & GARDINER, E.S. (2019) Tamm Review: Direct seeding to restore oak (*Quercus* spp.) forests and woodlands. *Forest Ecology and Management* **448**, 474–489.
- LONDOÑO-LEMONS, V., TORRES-GONZÁLES, A.M. & MADRIÑÁN, S. (2024) Linking Seed Traits and Germination Responses in Caribbean Seasonally Dry Tropical Forest Species. *Plants* **13**, 1318. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.

- MADSEN, M.D., DAVIES, K.W., BOYD, C.S., KERBY, J.D. & SVEJCAR, T.J. (2016a) Emerging seed enhancement technologies for overcoming barriers to restoration. *Restoration Ecology* **24**, S77–S84.
- MADSEN, M.D., HULET, A., PHILLIPS, K., STALEY, J.L., DAVIES, K.W. & SVEJCAR, T.J. (2016b) Extruded seed pellets: a novel approach for enhancing sagebrush seedling emergence. *Native Plants Journal* **17**, 230–243. University of Wisconsin Press.
- MANGUEIRA, J.R.S.A., HOLL, K.D. & RODRIGUES, R.R. (2019) Enrichment planting to restore degraded tropical forest fragments in Brazil. *Ecosystems and People* **15**, 3–10. Taylor & Francis.
- MARTINOTTO, F., MARTINOTTO, C., COELHO, M. DE F.B., AZEVEDO, R.A.B. E & ALBUQUERQUE, M.C. DE F. E (2012) Survival and initial growth of tree species native to the Cerrado intercropped with cassava. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* **47**, 22–29. Embrapa Secretaria de Pesquisa e Desenvolvimento; Pesquisa Agropecuária Brasileira.
- MASAREI, M., GUZZOMI, A.L., MERRITT, D.J. & ERICKSON, T.E. (2019) Factoring restoration practitioner perceptions into future design of mechanical direct seeders for native seeds. *Restoration Ecology* **27**, 1251–1262.
- MCDONALD, M.A., MCLAREN, K. & NEWTON, A. (2010) What are the mechanisms of regeneration post-disturbance in tropical dry forest? *CEE Review* **7**.
- MCLAREN, K.P. & MCDONALD, M.A. (2003) The effects of moisture and shade on seed germination and seedling survival in a tropical dry forest in Jamaica. *Forest Ecology and Management* **183**, 61–75.
- MELI, P., ISERNHAGEN, I., BRANCALION, P.H.S., ISERNHAGEN, E.C.C., BEHLING, M. & RODRIGUES, R.R. (2018) Optimizing seeding density of fast-growing native trees for restoring the Brazilian Atlantic Forest. *Restoration Ecology* **26**, 212–219.
- MERRITT, D.J. & DIXON, K.W. (2011) Restoration Seed Banks—A Matter of Scale. *Science* **332**, 424–425. American Association for the Advancement of Science.
- METCALFE, D.J. & GRUBB, P.J. (1997) The responses to shade of seedlings of very small-seeded tree and shrub species from tropical rain forest in Singapore. *Functional Ecology* **11**, 215–221.
- MINNEMEYER, S., LAESTADIUS, L., SIZER, N., SAINT-LAURENT, C. & POTAPOV, P. (2011) *A World of Opportunity*. World Resources Institute, Washington, DC.
- MIRANDA, E., CAMPOS-FILHO, E.M., VIEIRA, D., ROCHA, G., FERREIRA, M., PACHÊCO, B., CORTES, C., SILVA, J., MOTTA, C., CAMARGO, M., KUHLMANN, M., COSTA, L., DO CARMO, G., NASCIMENTO, J., LIMA, M., ET AL. (2020) *Espécies para Semeadura Direta na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica: Características de Sementes e Plantas, e Sugestões de Coleta, Processamento e Plantio*. Agroicone Ltda.
- MOLES, A.T. & LEISHMAN, M.R. (2008) The seedling as part of a plant's life history strategy. *Seedling ecology and evolution*, 217–238. Cambridge University Press Cambridge, UK.
- MOLES, A.T. & WESTOBY, M. (2004) Seedling survival and seed size: a synthesis of the literature. *Journal of Ecology* **92**, 372–383.
- MOLLARD, F.P.O., NAETH, M.A. & COHEN-FERNANDEZ, A. (2014) Impacts of mulch on prairie seedling establishment: Facilitative to inhibitory effects. *Ecological Engineering* **64**, 377–384.
- MORI, E.S., PIÑA-RODRIGUES, F.C. & FREITAS, N.P. (2012) *Sementes florestais: guia para germinação de 100 espécies nativas*. Instituto Refloresta.
- NAVARRO-CERRILLO, R.M., GRIFFITH, D.M., RAMÍREZ-SORIA, M.J., PARIONA, W., GOLICHER, D. & PALACIOS, G. (2011) Enrichment of big-leaf mahogany (*Swietenia macrophylla* King) in logging

- gaps in Bolivia: The effects of planting method and silvicultural treatments on long-term seedling survival and growth. *Forest Ecology and Management* **262**, 2271–2280.
- OLIVEIRA, M.C., OGATA, R.S., ANDRADE, G.A., SANTOS, D. DA S., SOUZA, R.M., GUIMARÃES, T.G., SILVA JÚNIOR, M.C., PEREIRA, D.J. DE S. & RIBEIRO, J.F. (2016) *Manual de viveiro e produção de mudas: espécies arbóreas nativas do Cerrado*. Editora Rede de Sementes do Cerrado, Brasília-DF.
- OLIVEIRA, M.N. (2011) Avaliação da capacidade de emergência de oito espécies de árvores do cerrado, milho, feijão-de-porco e plantas espontâneas sob diferentes quantidades de palhada de brachiaria. Monografia, Universidade de Brasília.
- OLIVEIRA, P.E. & SILVA, J.C.S. (1993) Reproductive biology of two species of *Kielmeyera* (Guttiferae) in the cerrados of Central Brazil. *Journal of Tropical Ecology* **9**, 67–79. Cambridge University Press.
- PALMA, A.C. & LAURANCE, S.G.W. (2015) A review of the use of direct seeding and seedling plantings in restoration: what do we know and where should we go? *Applied Vegetation Science* **18**, 561–568.
- PASSARETTI, R.A., PILON, N.A.L. & DURIGAN, G. (2020) Weed control, large seeds and deep roots: Drivers of success in direct seeding for savanna restoration. *Applied Vegetation Science* **23**, 406–416.
- PAUSAS, J.G., LAMONT, B.B., PAULA, S., APPEZZATO-DA-GLÓRIA, B. & FIDELIS, A. (2018) Unearthing belowground bud banks in fire-prone ecosystems. *New Phytologist* **217**, 1435–1448.
- PAZ, H. & MARTÍNEZ-RAMOS, M. (2003) Seed mass and seedling performance within eight species of *Psychotria* (rubiaceae). *Ecology* **84**, 439–450.
- PEDRINI, S., BALESTRAZZI, A., MADSEN, M.D., BHALSING, K., HARDEGREE, S.P., DIXON, K.W. & KILDISHEVA, O.A. (2020a) Seed enhancement: getting seeds restoration-ready. *Restoration Ecology* **28**, S266–S275.
- PEDRINI, S., GIBSON-ROY, P., TRIVEDI, C., GÁLVEZ-RAMÍREZ, C., HARDWICK, K., SHAW, N., FRISCHIE, S., LAVERACK, G. & DIXON, K. (2020b) Collection and production of native seeds for ecological restoration. *Restoration Ecology* **28**, S228–S238.
- PEDROL, N., PUIG, C.G., LÓPEZ-NOGUEIRA, A., PARDO-MURAS, M., GONZÁLEZ, L. & SOUZA-ALONSO, P. (2018) Optimal and synchronized germination of *Robinia pseudoacacia*, *Acacia dealbata* and other woody Fabaceae using a handheld rotary tool: concomitant reduction of physical and physiological seed dormancy. *Journal of Forestry Research* **29**, 283–290.
- PELLIZZARO, K.F., CORDEIRO, A.O.O., ALVES, M., MOTTA, C.P., REZENDE, G.M., SILVA, R.R.P., RIBEIRO, J.F., SAMPAIO, A.B., VIEIRA, D.L.M. & SCHMIDT, I.B. (2017) “Cerrado” restoration by direct seeding: field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. *Brazilian Journal of Botany* **40**, 681–693.
- PEREA, R., VENTURAS, M. & GIL, L. (2013) Empty Seeds Are Not Always Bad: Simultaneous Effect of Seed Emptiness and Masting on Animal Seed Predation. *PLOS ONE* **8**, e65573. Public Library of Science.
- PEREIRA, S.R., LAURA, V.A. & SOUZA, A.L.T. (2013a) Establishment of Fabaceae Tree Species in a Tropical Pasture: Influence of Seed Size and Weeding Methods. *Restoration Ecology* **21**, 67–74. John Wiley & Sons, Ltd.
- PÉREZ, D.R., GONZÁLEZ, F., CEBALLOS, C., ONETO, M.E. & ARONSON, J. (2019) Direct seeding and outplantings in drylands of Argentinean Patagonia: estimated costs, and prospects for large-scale restoration and rehabilitation. *Restoration Ecology* **27**, 1105–1116.
- PÉREZ-HARGUINDEGUY, N., DIAZ, S., GARNIER, E., LAVOREL, S., POORTER, H., JAUREGUIBERRY, P., BRET-HARTE, M.S., CORNWELL, W.K., CRAINE, J., GURVICH, D., URCELAY, C., VENEKLAAS, E., REICH,

- P., POORTER, L., WRIGHT, I.J., ET AL. (2013) New handbook for standardise measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany* **61**, 167–234.
- PILON, N.A.L., ASSIS, G.B., SOUZA, F.M. & DURIGAN, G. (2019) Native remnants can be sources of plants and topsoil to restore dry and wet cerrado grasslands. *Restoration Ecology* **27**, 569–580.
- PIOTROWSKI, I., PALADINES, H.M., DE ALMEIDA, L.S., LÓPEZ, A.M.T., DUTRA, F.B., FRANCISCO, B.S., DA SILVA, J.M.S. & PIÑA-RODRIGUES, F.C.M. (2023) Seeds' Early Traits as Predictors of Performance in Direct Seeding Restoration. *Forests* **14**, 547. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- PRITCHARD, H.W., DAWS, M.I., FLETCHER, B.J., GAMÉNÉ, C.S., MSANGA, H.P. & OMONDI, W. (2004) Ecological correlates of seed desiccation tolerance in tropical African dryland trees. *American Journal of Botany* **91**, 863–870.
- PUJOL, B., MÜHLEN, G., GARWOOD, N., HOROSZOWSKI, Y., DOUZERY, E.J.P. & MCKEY, D. (2005) Evolution under domestication: contrasting functional morphology of seedlings in domesticated cassava and its closest wild relatives. *New Phytologist* **166**, 305–318.
- R CORE TEAM (2024) *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RAUPP, P.P., FERREIRA, M.C., ALVES, M., CAMPOS-FILHO, E.M., SARTORELLI, P.A.R., CONSOLARO, H.N. & VIEIRA, D.L.M. (2020) Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. *Ecological Engineering* **148**, 105788.
- REDÁRIO (2024) O Redário é uma articulação entre redes e grupos de coletores de sementes, para estruturação da base da cadeia de restauração em larga escala, através da oferta de sementes de qualidade adequadas. <https://www.redario.org.br>.
- REIS, L.K., GUERRA, A., COLADO, M.L.Z., BORGES, F.L.G., OLIVEIRA, M. DA R., GONDIM, E.X., SINANI, T.R.F., GUERIN, N. & GARCIA, L.C. (2019) Which spatial arrangement of green manure is able to reduce herbivory and invasion of exotic grasses in native species? *Ecological Applications* **29**, e02000.
- RESSEL, K., GUILHERME, F.A.G., SCHIAVINI, I. & OLIVEIRA, P.E. (2004) Ecologia morfofuncional de plântulas de espécies arbóreas da Estação Ecológica do Panga, Uberlândia, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Botânica* **27**.
- RIBEIRO, G.V.T., TEIXIDO, A.L., BARBOSA, N.P.U. & SILVEIRA, F.A.O. (2016) Assessing bias and knowledge gaps on seed ecology research: implications for conservation agenda and policy. *Ecological Applications* **26**, 2033–2043.
- RIBEIRO, L.C., BARBOSA, E.R.M., VAN LANGEVELDE, F. & BORGHETTI, F. (2015) The importance of seed mass for the tolerance to heat shocks of savanna and forest tree species. *Journal of Vegetation Science* **26**, 1102–1111.
- RIBEIRO, L.C. & BORGHETTI, F. (2014) Comparative effects of desiccation, heat shock and high temperatures on seed germination of savanna and forest tree species. *Austral Ecology* **39**, 267–278.
- RIZZINI, C.T. (1965) Estudos experimentais sobre o xilopódio e outros órgãos tuberosos de plantas do cerrado. *Anais da Academia brasileira de Ciências* **37**, 87–113.
- RODRIGUES, R.R., LIMA, R.A.F., GANDOLFI, S. & NAVE, A.G. (2009) On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation* **142**, 1242–1251.

- RODRIGUES, S.B., FREITAS, M.G., CAMPOS-FILHO, E.M., CARMO, G.H.P., VEIGA, J.M., JUNQUEIRA, R.G.P. & VIEIRA, D.L.M. (2019) Direct seeded and colonizing species guarantee successful early restoration of South Amazon forests. *Forest Ecology and Management* **451**, 117559.
- ROSE, S.A. & POORTER, L. (2003) The importance of seed mass for early regeneration in tropical forest: a review. In *Long-term changes in tropical tree diversity: Studies from the Guiana Shield, Africa, Borneo and Melanesia* pp. 19–35. Tropenbos, Wageningen.
- SAATKAMP, A., COCHRANE, A., COMMANDER, L., GUJA, L.K., JIMENEZ-ALFARO, B., LARSON, J., NICOTRA, A., POSCHLOD, P., SILVEIRA, F.A.O., CROSS, A.T., DALZIELL, E.L., DICKIE, J., ERICKSON, T.E., FIDELIS, A., FUCHS, A., ET AL. (2019) A research agenda for seed-trait functional ecology. *New Phytologist* **221**, 1764–1775.
- SALAZAR, A., GOLDSTEIN, G., FRANCO, A.C. & MIRALLES-WILHELM, F. (2011) Timing of seed dispersal and dormancy, rather than persistent soil seed-banks, control seedling recruitment of woody plants in Neotropical savannas. *Seed Science Research* **21**, 103–116. Cambridge University Press.
- SALAZAR, A., GOLDSTEIN, G., FRANCO, A.C. & MIRALLES-WILHELM, F. (2012b) Differential seedling establishment of woody plants along a tree density gradient in Neotropical savannas. *Journal of Ecology* **100**, 1411–1421.
- SALAZAR, A., GOLDSTEIN, G., FRANCO, A.C. & MIRALLES-WILHELM, F. (2012a) Seed limitation of woody plants in Neotropical savannas. *Plant Ecology* **213**, 273–287.
- SAMPAIO, A.B., HOLL, K.D. & SCARIOT, A. (2007) Does Restoration Enhance Regeneration of Seasonal Deciduous Forests in Pastures in Central Brazil? *Restoration Ecology* **15**, 462–471.
- SAMPAIO, A.B., VIEIRA, D.L.M., HOLL, K.D., PELLIZZARO, K.F., ALVES, M., COUTINHO, A.G., CORDEIRO, A., RIBEIRO, J.F. & SCHMIDT, I.B. (2019) Lessons on direct seeding to restore Neotropical savanna. *Ecological Engineering* **138**, 148–154.
- SANTOS, H.P. & BUCKERIDGE, M.S. (2004) The Role of the Storage Carbon of Cotyledons in the Establishment of Seedlings of *Hymenaea courbaril* Under Different Light Conditions. *Annals of Botany* **94**, 819–830.
- SAUTU, A., BASKIN, J.M., BASKIN, C.C. & CONDIT, R. (2006) Studies on the seed biology of 100 native species of trees in a seasonal moist tropical forest, Panama, Central America. *Forest Ecology and Management* **234**, 245–263.
- SAUTU, A., BASKIN, J.M., BASKIN, C.C., DEAGO, J. & CONDIT, R. (2007) Classification and ecological relationships of seed dormancy in a seasonal moist tropical forest, Panama, Central America. *Seed Science Research* **17**, 127–140.
- SCALOPPI, J.C. & SOUZA, A.L.T. DE (2020) Simultaneous effects of reintroduction strategy and seed size on the initial development of two tropical tree species in an abandoned eucalyptus plantation. *Australian Journal of Botany* **68**, 439–448. CSIRO PUBLISHING.
- SCHMIDT, I.B., URZEDO, D.I., PIÑA-RODRIGUES, F.C.M., VIEIRA, D.L.M., DE REZENDE, G.M., SAMPAIO, A.B. & JUNQUEIRA, R.G.P. (2019) Community-based native seed production for restoration in Brazil – the role of science and policy. *Plant Biology* **21**, 389–397.
- SHAW, N., BARAK, R.S., CAMPBELL, R.E., KIRMER, A., PEDRINI, S., DIXON, K. & FRISCHIE, S. (2020) Seed use in the field: delivering seeds for restoration success. *Restoration Ecology* **28**, S276–S285.
- SILVA, R.R.P., OLIVEIRA, D.R., ROCHA, G.P.E. & VIEIRA, D.L.M. (2015) Direct seeding of Brazilian savanna trees: effects of plant cover and fertilization on seedling establishment and growth. *Restoration Ecology* **23**, 393–401.
- SILVA, R.R.P. & VIEIRA, D.L.M. (2017) Direct seeding of 16 Brazilian savanna trees: responses to seed burial, mulching and an invasive grass. *Applied Vegetation Science* **20**, 410–421.

- SILVEIRA, F.A.O. (2013) Sowing seeds for the future: the need for establishing protocols for the study of seed dormancy. *Acta Botanica Brasilica* **27**, 264–269.
- SIMON, M.F. & HAY, J.D.V. (2003) Comparison of a common and rare species of Mimosa (Mimosaceae) in Central Brazil. *Austral Ecology* **28**, 315–326.
- SIMONS, A.M. & JOHNSTON, M.O. (2006) Environmental and genetic sources of diversification in the timing of seed germination: Implications for the evolution of bet hedging. *Evolution* **60**, 2280–2292.
- SOUZA, C.S., PAULO, M.L., CRUZ, J. DE O., NUNES, T.C., CARVALHO, S.K.M., NOGUEIRA, E. DO V., ALVES, A.C.T.L., GOMES, A.S. & BORGHETTI, F. (2021a) Efeitos do Tegumento e teor de água de sementes de *Plathymenia reticulata* e *Stryphnodendron adstringens* na tolerância a choques térmicos. *Hoehnea* **48**, e012021. Instituto de Pesquisas Ambientais.
- SOUZA, D.C. (2022) Forest restoration by direct seeding: a global bibliometric analysis. *Restoration Ecology* **30**, e13631.
- SOUZA, D.C. & ENGEL, V.L. (2018) Direct seeding reduces costs, but it is not promising for restoring tropical seasonal forests. *Ecological Engineering* **116**, 35–44.
- SOUZA, D.C. & ENGEL, V.L. (2023) Advances, challenges, and directions for ecological restoration by direct seeding of trees: Lessons from Brazil. *Biological Conservation* **284**, 110172.
- SOUZA, D.C., ENGEL, V.L. & MATTOS, E.C. (2021b) Direct seeding to restore tropical seasonal forests: effects of green manure and hydrogel amendment on tree species performances and weed infestation. *Restoration Ecology* **29**, e13277.
- TAYLOR, J.B., CASS, K.L., ARMOND, D.N., MADSEN, M.D., PEARSON, D.E. & ST. CLAIR, S.B. (2020) Deterring rodent seed-predation using seed-coating technologies. *Restoration Ecology* **28**, 927–936.
- TEN BRINK, H., GREMER, J.R. & KOKKO, H. (2020) Optimal germination timing in unpredictable environments: the importance of dormancy for both among- and within-season variation. *Ecology Letters* **23**, 620–630.
- TUNJAI, P. & ELLIOTT, S. (2012) Effects of seed traits on the success of direct seeding for restoring southern Thailand's lowland evergreen forest ecosystem. *New Forests* **43**, 319–333.
- URZEDO, D.I. DE, PIÑA-RODRIGUES, F.C.M., FELTRAN-BARBIERI, R., JUNQUEIRA, R.G.P. & FISHER, R. (2020) Seed Networks for Upscaling Forest Landscape Restoration: Is It Possible to Expand Native Plant Sources in Brazil? *Forests* **11**, 259. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- VÁLIO, I.F.M. & SCARPA, F.M. (2001a) Germination of seeds of tropical pioneer species under controlled and natural conditions. *Revista Brasileira de Botânica* **24**, 79–84.
- VÁLIO, I.F.M. & SCARPA, F.M. (2001b) Germination of seeds of tropical pioneer species under controlled and natural conditions. *Brazilian Journal of Botany* **24**, 79–84. Sociedade Botânica de São Paulo.
- VÁSQUEZ-CASTRO, D.C., RODRIGUES, R.R., MELI, P., BRANCALION, P.H.S., SILVA, R.R. & COUTO, H.T.Z. (2020) Preliminary results of using green manure species as a cost-effective option for forest restoration. *Scientia Forestalis* **48**, e3374.
- VAZQUEZ-YANES, C., OROZCO-SEGOVIA, A., RINCON, E., SANCHEZ-CORONADO, M.E., HUANTE, P., TOLEDO, J.R. & BARRADAS, V.L. (1990) Light beneath the litter in a tropical forest: Effect on seed germination. *Ecology* **71**, 1952–1958.
- VIEIRA, D.L.M., CAMPOS-FILHO, E.M., FERREIRA, M.C., MIRANDA, E., ROCHA, G.B., ALVES, M., SAMPAIO, A. & ANTONIAZZI, L. (2020) *Guia de semeadura direta para restauração de florestas e cerrados*. 1. ed. Agroicone Ltda, São Paulo.



- VIEIRA, D.L.M., LIMA, V.V. DE, SEVILHA, A.C. & SCARIOT, A. (2008) Consequences of dry-season seed dispersal on seedling establishment of dry forest trees: Should we store seeds until the rains? *Forest Ecology and Management* **256**, 471–481.
- VIEIRA, D.L.M., RODRIGUES, S.B., JAKOVAC, C.C., DA ROCHA, G.P.E., REIS, F. & BORGES, A. (2021) Active Restoration Initiates High Quality Forest Succession in a Deforested Landscape in Amazonia. *Forests* **12**, 1022. Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- VIEIRA, D.L.M., SARTORELLI, P.A.R., SOUSA, A.P. & REZENDE, G.M. (2017) Avaliação de indicadores da recomposição da vegetação nativa no Distrito Federal e em Mato Grosso. Iniciativa para o Uso da Terra. <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085222/avaliacao-de-indicadores-da-recomposicao-da-vegetacao-nativa-no-distrito-federal-e-em-mato-grosso> [accessed 19 April 2024].
- VIEIRA, D.L.M. & SCARIOT, A. (2006a) Principles of Natural Regeneration of Tropical Dry Forests for Restoration. *Restoration Ecology* **14**, 11–20.
- VIEIRA, D.L.M. & SCARIOT, A. (2006b) Effects of logging, liana tangles and pasture on seed fate of dry forest tree species in Central Brazil. *Forest Ecology and Management* **230**, 197–205.
- VITIS, M., HAY, F.R., DICKIE, J.B., TRIVEDI, C., CHOI, J. & FIEGENER, R. (2020) Seed storage: maintaining seed viability and vigor for restoration use. *Restoration Ecology* **28**, S249–S255.
- WALTER, H. (1986) *Vegetação e zonas climáticas: tratado de ecologia global*. Pedagógica e Universitária, São Paulo.
- WEBAMBIENTE (2024) Estratégias de recomposição da vegetação nativa. Embrapa. <https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br/publico/especies.xhtml>.
- WESTOBY, M., FALSTER, D.S., MOLES, A.T., VESK, P.A. & WRIGHT, I.J. (2002) Plant Ecological Strategies: Some Leading Dimensions of Variation Between Species. *Annual Review of Ecology and Systematics* **33**, 125–159.
- WESTOBY, M., JURADO, E. & LEISHMAN, M. (1992) Comparative evolutionary ecology of seed size. *Trends in Ecology & Evolution* **7**, 368–372.
- WHITMORE, T.C. (1989) Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees. *Ecology* **70**, 536–538. Ecological Society of America.
- WIEDERHECKER, A., CARDOSO FERREIRA, M., BARBOSA RODRIGUES, S., BONESSO SAMPAIO, A., BELLONI SCHMIDT, I., RIBEIRO, J.F., OGATA, R.S., RODRIGUES, M.I., SILVA-COELHO, A.C., SOUSA ABREU, I., MONTENEGRO, T.F. & MASCIA VIEIRA, D.L. (2024) Ten years of directing seeding restoration in the Brazilian savanna: Lessons learned and the way forward. *Journal of Environmental Management* **365**, 121576.
- WILLIAMS, M.I., DUMROESE, R.K., PAGE-DUMROESE, D.S. & HARDEGREE, S.P. (2016) Can biochar be used as a seed coating to improve native plant germination and growth in arid conditions? *Journal of Arid Environments* **125**, 8–15.
- WOODS, K. & ELLIOTT, S. (2004) Direct seeding for forest restoration on abandoned agricultural land in northern Thailand. *Journal of Tropical Forest Science* **16**, 248–259. Forest Research Institute Malaysia.
- WRIGHT, S.J., ZEBALLOS, H., DOMÍNGUEZ, I., GALLARDO, M.M., MORENO, M.C. & IBÁÑEZ, R. (2000) Poachers Alter Mammal Abundance, Seed Dispersal, and Seed Predation in a Neotropical Forest. *Conservation Biology* **14**, 227–239.
- ZAHAWI, R.A. (2005) Establishment and Growth of Living Fence Species: An Overlooked Tool for the Restoration of Degraded Areas in the Tropics. *Restoration Ecology* **13**, 92–102.

- ZAHAWI, R.A. & HOLL, K.D. (2014) *Evaluation of different tree propagation methods in ecological restoration in the neotropics*. Genetic considerations in ecosystem restoration using native tree species. FAO and Bioversity International.
- ZENNI, R.D. & ZILLER, S.R. (2011) An overview of invasive plants in Brazil. *Brazilian Journal of Botany* **34**, 431–446. Sociedade Botânica de São Paulo.
- ZHANG, Z., LUO, X., CHEN, D., CHEN, L. & HU, X. (2021) Seed germination traits predict seedling emergence rather than survival of *Stipa breviflora* in populations along a latitude gradient. *Land Degradation & Development* **32**, 4417–4429.