

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e
Meio Ambiente - PRODEMA

RENAN AVERSARI CÂMARA

SISTEMA DE SEMEADURA AÉREA POR FOGUETES HIDROPNEUMÁTICOS
COMO FERRAMENTA DE RECUPERAÇÃO DE COBERTURA VEGETAL EM
ÁREAS DEGRADADAS NA CAATINGA: UM ESTUDO DE VIABILIDADE

JOÃO PESSOA
2024

RENAN AVERSARI CÂMARA

SISTEMA DE SEMEADURA AÉREA POR FOGUETES HIDROPNEUMÁTICOS COMO
FERRAMENTA DE RECUPERAÇÃO DE COBERTURA VEGETAL EM ÁREAS
DEGRADADAS NA CAATINGA: UM ESTUDO DE VIABILIDADE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente – PRODEMA como requisito parcial para obtenção de grau de doutor.

Orientador: Bartolomeu Israel de Sousa
Coorientador: Bruno César Bezerra Nóbrega de Souza

João Pessoa
2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C172s Camara, Renan Aversari.

Sistema de sementeira aérea por foguetes hidropneumáticos como ferramenta de recuperação de cobertura vegetal em áreas degradadas na caatinga: um estudo de viabilidade / Renan Aversari Camara. - João Pessoa, 2024.

148 f. : il.

Orientação: Bartolomeu Israel de Souza.

Coorientação: Bruno César Bezerra Nóbrega de Souza.
Tese (Doutorado) - UFPB/CCEN.

1. Degradação. 2. Caatinga. 3. Reflorestamento. 4. Dispersão. I. Souza, Bartolomeu Israel de. II. Souza, Bruno César Bezerra Nóbrega de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 581.5(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Programa Regional de Pós-Graduação
Em Desenvolvimento e Desenvolvimento e Meio Ambiente
DOUTORADO

Ata da 76ª Sessão Pública de Defesa de Tese de **Renan Aversari Câmara** do Curso de PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE EM ASSOCIAÇÃO A REDE PRODEMA, Doutorado, na área de Desenvolvimento e Meio Ambiente. Aos quatro do mês de junho do ano de dois mil e vinte e quatro, às 10h00min, reuniram-se por videoconferência, nos termos do art. 82 do Regulamento Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação “stricto sensu” da UFPB, anexo à Resolução CONSEPE no 79/2013, a Banca Examinadora, composta pelos professores(as) doutores(as): BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA - UFPB, orientador e presidente da banca, EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA - UFPB, VALERIA PEIXOTO BORGES examinadora externa ao Programa, ANDRE LUIZ QUEIROGA REIS examinador externo e JOSÉ MACHADO MOITA NETO examinador externo pertencente a Rede. Deu-se início a abertura dos trabalhos, por parte do(a) presidente da banca, BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA, que, após apresentar os membros da banca examinadora e esclarecer a tramitação da defesa, solicitou o candidato que iniciasse a apresentação da tese, intitulada “**SISTEMA DE SEMEADURA AÉREA POR VEÍCULOS REACIONAIS DE BAIXO CUSTO COMO FERRAMENTA DE RECUPERAÇÃO DE COBERTURA VEGETAL EM ÁREAS DEGRADADAS NA CAATINGA**”. Concluída a exposição, o professor Dr. BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA, presidente, passou a palavra a professora Dra. VALERIA PEIXOTO BORGES, para arguir o candidato, em seguida ao Dr. ANDRÉ LUIZ QUEIROGA REIS, em sequência ao professor Dr. JOSÉ MACHADO MOITA NETO e, por fim, ao professor Dr. EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA. Após alguns comentários sobre a defesa, o presidente da banca examinadora solicitou a retirada do candidato e da plateia para que a banca pudesse proceder com a avaliação do discente em sessão secreta. Na sequência, a banca examinadora atribuiu o conceito APROVADO, conforme o art. 83 do anexo à Resolução CONSEPE-UFPB N° 79/2013.

Prof(a) Dr(a) BARTOLOMEU ISRAEL DE SOUZA
Presidente/Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **EDUARDO RODRIGUES VIANA DE LIMA**
Data: 08/07/2024 22:01:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ QUEIROGA REIS**
Data: 06/07/2024 14:56:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. EDUARDO RODRIGUES VIANA
DE LIMA
Avaliador interno

Prof. Dr. ANDRE LUIZ QUEIROGA REIS
Avaliador externo

Documento assinado digitalmente
 **VALERIA PEIXOTO BORGES**
Data: 06/07/2024 14:26:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
 **JOSE MACHADO MOITA NETO**
Data: 05/07/2024 17:10:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. VALERIA PEIXOTO BORGES
Avaliadora externa

Prof. Dr. JOSÉ MACHADO MOITA NETO
Avaliador externo (Rede)

Dedico este trabalho à minha família, aos que tenho com muito amor, motivo de dedicação, esforço e empenho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Bartolomeu Israel de Souza, pelo carinho, inspiração, presteza e dedicação.

Ao meu coorientador Bruno César Bezerra Nóbrega de Souza, e ao colega André Luiz Queiroga Reis pelas críticas e contribuições valorosas.

À minha querida esposa Karla Lima de Queiroz, pelo amor, paciência, atenção e apoio.

Aos colegas Luther, Matheus e Michele pelo suporte e auxílio na concepção, confecção e execução dos ensaios experimentais nesta tese abordados.

Aos meus pais pela eterna dedicação e zelo pela minha educação e caráter.

A todos meus demais professores, os quais, sem sombra de dúvidas, contribuíram para a feitura deste trabalho.

Por fim, agradeço aos colegas de turma e de trabalho, assim como a todos aqueles que colaboraram de qualquer forma para a consubstanciação deste trabalho.

A todos, o meu mais sincero obrigado.

“A melhor época para plantar uma árvore foi há vinte anos. A segunda melhor é agora.”

Provérbio chinês

RESUMO

Recuperar áreas degradadas é um processo difícil, onde o histórico e a intensidade de uso das terras, aliado com as condições naturais dominantes, são variáveis fundamentais. Além disso, a implantação das técnicas atualmente existentes é limitada, muitas vezes, devido ao seu alto custo. Todos esses fatores são ainda mais expressivos em biomas com baixa pluviosidade e grandes áreas onde ocorre a supressão de parte da cobertura vegetal. Este trabalho trata sobre a dispersão experimental de sementes de espécies vegetais nativas do bioma Caatinga, para fins de recuperação de áreas degradadas por diversas ações antrópicas seculares. A metodologia consistiu em desenvolver foguetes de baixo custo, propelidos à água e ar pressurizados, dotado de sistema de ejeção ativa da carga útil, bem como de recuperação, destinado à dispersão aérea de sementes, tendo por base a técnica de nucleação, respeitando-se o processo de sucessão ecológica. Foram utilizadas no experimento, sementes encapsuladas em um pellet de argila bentonita, papel *Kraft* e pó de coco (*Cocos nucifera*), para oferecer resistência à predação, uniformidade aerodinâmica e maior contenção de umidade, das espécies *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill, *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis e *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud, comuns nesse bioma, sendo acompanhada a sua evolução em campo, observando se as mesmas apresentariam germinação. Os resultados iniciais demonstraram que o veículo utilizado apresentou funcionamento correto, de acordo com as previsões teóricas feitas. Quanto aos ensaios de germinação das sementes em campo, observou-se que, para *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis e *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud, o material disperso não obteve sucesso, enquanto *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill apresentou apenas cerca de 20% de resultado favorável. Como possíveis razões desse resultado, observou-se o alto nível de degradação da área onde as sementes foram distribuídas, e a escolha do material de encapsulamento das sementes, que não forneceu a umidade necessária para germinação, agindo individualmente ou em conjunto.

Palavras-chave: Degradação; Caatinga; Reflorestamento; Dispersão aérea.

ABSTRACT

Recovering degraded areas is a difficult process, where the history and intensity of use of these lands, combined with the prevailing natural conditions, are fundamental variables. In addition, the implementation of existing techniques is often limited due to their high cost. All these factors are even more expressive in biomes with low rainfall and large areas where part of the vegetation cover is suppressed. This work deals with the experimental dispersal of seeds of native plant species of the Caatinga biome, for the purpose of recovering areas degraded by various secular anthropic actions. The methodology consisted of using low-cost rockets, propelled by pressurized water and air, equipped with an active ejection system of the payload, as well as recovery, intended for the aerial dispersal of seeds, based on the nucleation technique, respecting the process of ecological succession. Seeds encapsulated in a bentonite clay pellet, Kraft paper and coconut powder (*Cocos nucifera*) were used in the experiment to offer resistance to predation, aerodynamic uniformity and greater moisture containment in the species *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill, *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis and *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud, common in this biome, and their evolution was monitored in the field, observing if they would germinate. The initial results showed that the vehicle used worked correctly, according to the theoretical predictions made. Regarding the seed germination trials in the field, it was observed that, for *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis and *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud, the dispersed material was not successful, while *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill presented only about 20% of favorable result. As possible reasons for this result, we have the high level of degradation of the area, the choice of seed encapsulation material, which did not provide the necessary moisture for germination, acting individually or together.

Keywords: Degradation; Caatinga; Reforestation; Aerial dispersal.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
Contextualização e Justificativa	10
Questão central	11
Hipótese.....	11
Objetivos.....	11
Aspectos metodológicos gerais	12
Estrutura da Tese	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Reflorestamento em Terras Secas (drylands)	22
2.2 Reflorestamento na Caatinga.....	31
2.3 Técnica de nucleação para recuperação de áreas degradadas	36
2.4 Custos inerentes às atividades de reflorestamento	41
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	48
3.1 Desenvolvimento de foguetes dispersores.....	49
3.2 Peletização e germinação de sementes: ensaios de laboratório.....	54
3.3 Peletização e germinação de sementes: ensaios de campo.....	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
4.1 Sistema de dispersão aérea	63
4.2 Germinação.....	73
Análise de custos	84
CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS	89
APÊNDICE I: Desenvolvimento dos foguetes dispersores.....	98
Sistema de abastecimento, pressurização e lançamento.....	111
APÊNDICE II: Modelagem matemática	114
Propulsão	114
Voo livre.....	126
Dispersão aérea simulada	133
Teste de voo e análise por vídeo.....	138
APÊNDICE III: Análise de custos de operação	142

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Bioma da Caatinga.....	16
Figura 2: Área desmatada acumulada no Estado da Paraíba 1987 - 2017	17
Figura 3: Resumo gráfico da pesquisa	48
Figura 4: Diagrama de elementos de propulsão de foguetes à água	50
Figura 5: Fluxograma do desenvolvimento dos foguetes dispersores	51
Figura 6: Foguete de teste montado	53
Figura 7: Semente germinando em pellet de tapioca	55
Figura 8: Sementeira com testes preliminares de encapsulamento	56
Figura 9: Estufa automatizada.....	56
Figura 10: Separação de amostras de solo no interior da estufa	57
Figura 11: Mapa da fazenda Salambaia	58
Figura 12: Área de testes com degradação alta.....	59
Figura 13: Área de testes com degradação moderada.....	59
Figura 14: Área de testes com degradação moderada.....	60
Figura 15: Área de controle.....	61
Figura 16: Lançamento e recuperação do foguete de dispersão	62
Figura 17: Medição da velocidade por análise de vídeo	64
Figura 18: Compêndio de lançamento	65
Figura 19: Curva medida da velocidade em função do tempo.....	67
Figura 20: Curva simulada de velocidade em função do tempo	67
Figura 21: Padrão de distribuição das sementes em solo.....	68
Figura 22: Germinação de <i>J. mollissima</i> em regime de abundância de água	74
Figura 23: Compêndio de germinação	76
Figura 24: Diagrama de recorte e colagem das garrafas	98
Figura 25: Garrafas coladas para verificação de vazamento.....	99
Figura 26: Câmara de pressão no suporte de laminação	100
Figura 27: Projetos mecânicos dos foguetes de teste e dispersor.....	101
Figura 28: Simulação em túnel de vento: velocidade	102
Figura 29: Simulação em túnel de vento: pressão.....	102
Figura 30: Molde da aleta em alumínio	103
Figura 31: Canhão de ar	104

Figura 32: Padrão de distribuição do disparo.....	104
Figura 33: Distribuição de frequências horizontal e vertical do disparo	105
Figura 34: Válvula de abertura rápida.....	106
Figura 35: Dispositivo para medição de constante de mola.....	107
Figura 36: Gráfico da força vs. deslocamento da mola.....	108
Figura 37: Diagrama elétrico do computador de bordo	109
Figura 38: Montagem do foguete dispersor	110
Figura 39: Foguetes de teste montado.....	110
Figura 40: Controle remoto de lançamento.....	111
Figura 41: Sistema de válvulas para abastecimento e pressurização	112
Figura 42: Base de lançamento	113
Figura 43: Compêndio de lançamento	114
Figura 44: Gráfico da Equação 1.10	116
Figura 45: Gráfico da Equação 1.24	118
Figura 46: Gráfico da Equação 1.65	123
Figura 47: Diagrama de forças	126
Figura 48: Gráfico de trajetória do foguete.....	132
Figura 49: Diagrama de restrição de amplitude da distribuição	134
Figura 50: Curva de distribuição gaussiana ajustada	135
Figura 51: Plotagem de dispersão no solo.....	136
Figura 52: Medição da velocidade por análise de vídeo	138
Figura 53: Curva medida de velocidade em função do tempo.....	139
Figura 54: Curva simulada de velocidade em função do tempo	140

INTRODUÇÃO

Contextualização e Justificativa

A recuperação de áreas degradadas é um desafio ambiental significativo, especialmente em biomas como a Caatinga, que enfrentam pressões adicionais devido à baixa pluviosidade e à histórica exploração agropecuária. A Caatinga, bioma exclusivo do Brasil, cobre aproximadamente 734 mil km², predominantemente no Nordeste, e é caracterizada por seu clima semiárido, com precipitação anual média inferior a 800 mm (SILVA et al., 2004). Esta região, embora adaptada às condições de aridez, sofre intensamente com a degradação ambiental causada por práticas agrícolas insustentáveis, desmatamento e uso inadequado do solo.

A degradação dessas áreas compromete não apenas a biodiversidade, mas também a subsistência das comunidades locais que dependem desses ecossistemas. A flora e fauna nativas são afetadas pela perda de habitat e pela fragmentação das paisagens, o que leva à diminuição das populações de espécies endêmicas e à ameaça de extinção (WWF, 2024; NATIONAL GEOGRAPHIC, 2019). Além disso, a degradação do solo, exacerbada pela erosão e pela perda de cobertura vegetal, reduz a capacidade de retenção de água, agravando os efeitos das secas prolongadas e comprometendo a regeneração natural da vegetação (WWF, 2024).

As comunidades locais, muitas das quais dependem diretamente dos recursos naturais para a agricultura, pecuária e coleta de produtos florestais, enfrentam desafios econômicos e sociais devido à degradação ambiental. A redução da produtividade agrícola, causada pela deterioração da qualidade do solo, força os agricultores a expandirem suas áreas de cultivo, intensificando ainda mais a degradação. Isso cria um ciclo vicioso de exploração e esgotamento dos recursos naturais, que é difícil de interromper sem intervenções eficazes e sustentáveis (ROYAL SOCIETY, 2024). Nesse contexto, a recuperação de áreas degradadas na Caatinga se torna uma prioridade não apenas ambiental, mas também socioeconômica. Projetos de restauração ecológica que visam reintroduzir espécies nativas, melhorar a estrutura do solo e restabelecer os processos ecológicos essenciais são cruciais para a revitalização desses ecossistemas.

Em suma, a recuperação de áreas degradadas na Caatinga é uma tarefa complexa que demanda abordagens multidisciplinares e inovadoras. A aplicação de tecnologias de baixo custo e ecologicamente sustentáveis, aliada ao engajamento das comunidades locais e ao suporte de políticas públicas, pode transformar a realidade dessas áreas, promovendo a conservação da biodiversidade e a melhoria das condições de vida das populações que dependem desse bioma.

Com esse cenário de fundo funcionando como motivação, pensou-se no desenvolvimento de foguete hidropneumático reutilizável e não poluente, com baixo custo de fabricação e operação, para dispersão aérea de sementes em larga escala. Vislumbra-se, também, a correta escolha de espécies com capacidade de adaptação aos cenários de degradação a serem enfrentados, objetivando-se processos de sucessão ecológica. Outrossim, verifica-se a necessidade de tratamento/encapsulamento das sementes com intuito de maximizar a taxa de germinação e sobrevivência, minimizando as intervenções posteriores ao plantio

Para a tarefa pretendida nesse trabalho, optou-se por trabalhar com três espécies conhecidas pela sua resistência às condições climáticas desafiadoras, observadas na Caatinga, tidas no meio científico como pioneiras. Tais espécies são: *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill, *Cenostigma pyramidale* (Tul.) E. Gagnon & G.P. Lewis e *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud.

Tendo em mente os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, verifica-se que a aplicação da tecnologia proposta tem potencial para enquadramento nos objetivos 13 – Ação contra a mudança global do clima e 15 – Vida terrestre.

A aposta é que sistemas simples e, principalmente, de baixo custo encontrem o apelo econômico necessário para alavancar ações que viabilizem os objetivos fundados na recuperação de cobertura vegetal.

Questão central

A questão norteadora que se atrela ao desenvolvimento deste trabalho parte da seguinte indagação: pode uma tecnologia ambiental de baixo custo baseada em foguete reutilizável, não poluente e confeccionado a partir de matriz reciclada, funcionar como uma ferramenta de recuperação de cobertura vegetal de áreas degradadas na Caatinga?

Hipótese

A hipótese levantada é de que esta tecnologia ambiental funcione como um hábil e acessível mecanismo de dispersão de sementes de espécies vegetais pioneiras, no âmbito da sucessão ecológica, em áreas degradadas na Caatinga.

Objetivos

Como objetivo principal, buscou-se: avaliar a viabilidade de aplicação um sistema de dispersão aérea controlada de sementes de espécies vegetais pioneiras em áreas degradadas na Caatinga, com o intuito de dar início ao processo de sucessão ecológica, em ações concretas de recuperação ambiental.

Os objetivos específicos foram descritos como:

1. Desenvolver foguetes reutilizáveis, de baixo custo, não poluentes, de fácil operação e manuseio e construídos, majoritariamente, com materiais reaproveitados, dotado de mecanismo de dispersão controlada de sementes por via aérea;
2. Desenvolver um método de peletização de sementes que maximize a taxa de germinação;
3. Monitorar a evolução das áreas semeadas sem interveniência posterior a dispersão das sementes, analisando a efetividade de germinação e crescimento;

Aspectos metodológicos gerais

A presente pesquisa caracteriza-se como uma pesquisa exploratório-descritiva, albergando estudo de campo, monitoramento da semeadura e comportamento das áreas de testes, de abordagem tanto quantitativa, quanto qualitativa, sendo de técnica experimental quando do desenvolvimento de protótipos de semeadura aérea e peletização das sementes.

A delimitação territorial da pesquisa deu-se nos ambientes da Universidade Federal da Paraíba, Campus I e II, bem como em áreas degradadas pela exploração agropecuária da fazenda Salambaia, inserida na microrregião do Cariri no Estado da Paraíba, pertencente ao bioma de Caatinga. A fazenda situa-se a 500 m de altitude com uma área de 10,438 km² e 13,946 km de perímetro, na divisa entre os municípios de Cabaceiras e Boa Vista.

Tal local se justifica, como enunciado, pela facilitação de acesso de pesquisadores, bem como por ser uma área de acesso controlado, proporcionando um ambiente favorável para experimentação.

Estrutura da Tese

Referencial Teórico: Este capítulo traz a problemática detalhada e devidamente referenciada, revisa a literatura sobre reflorestamento em terras secas, na Caatinga, técnica de nucleação para recuperação de áreas degradadas e custos sobre reflorestamento.

Procedimentos Metodológicos: aqui são detalhados os métodos e técnicas desenvolvidas e utilizadas no desenvolvimento e implementação do sistema de semeadura aérea. Inclui o desenvolvimento dos foguetes dispersores, a peletização e os ensaios de germinação das sementes, tanto em laboratório quanto em campo.

Resultados e Discussão: manifestam os resultados obtidos com os experimentos realizados, discutindo a eficácia dos foguetes hidropneumáticos, a taxa de germinação das

sementes e os fatores que influenciaram os resultados, bem como discute uma análise de custos estimados para aplicação da tecnologia desenvolvida. A discussão é embasada em comparações com estudos anteriores e análises críticas dos dados coletados.

Conclusão: Resumo das principais descobertas da pesquisa, destacando a contribuição do estudo para o campo da recuperação ambiental e propondo recomendações para futuros trabalhos. Ele também discute as limitações do estudo e sugere melhorias para a metodologia empregada.

Apêndices: apresenta materiais complementares que suportam a pesquisa, como a metodologia detalhada para construção dos foguetes, desenvolvimento explícito da modelagem necessária ao planejamento de eventuais missões de dispersão e a análise de custos estimada para operações de reflorestamento utilizando o sistema de dispersão aérea de sementes por foguetes aqui proposto.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Uma das questões latentes da atualidade no que diz respeito ao desenvolvimento social e econômico diz respeito à preservação e utilização racional dos recursos naturais, manutenção de um meio ambiente saudável e um ecossistema equilibrado. Apesar de inúmeros estudos e pesquisas inerentes aos reflexos negativos da atividade humana pós-moderna sobre os ambientes, as principais regras econômicas, postas por um regime econômico liberal consumista, acabam por ignorar os alertas e perigos relacionados a danos potencialmente irreversíveis ao meio ambiente.

O desenvolvimento de tecnologias com baixo potencial lesivo ao meio ambiente, sistemas de minimização energética, reciclagem, controle populacional e, sobretudo, recuperação de áreas degradadas, formalizam um protagonismo imperioso no que tange à sustentabilidade demandada pelo século XXI.

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2021) existe uma estimativa de que o Brasil possua um déficit de cerca de 43 milhões de hectares de Áreas de Preservação Permanente (APPs) e de 42 milhões de hectares de Reserva Legal – RL.

O respaldo para a recuperação de áreas degradadas encontra sustento jurídico inicialmente na Constituição Federal de 1988, em seu art. 225:

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

§ 1º - Para assegurar a efetividade desse direito, incumbe ao Poder Público:
I - preservar e restaurar os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas;

§ 2º - Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei.

A Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, traz as seguintes menções sobre a recuperação de áreas degradadas:

Art. 2º - A Política Nacional do Meio Ambiente tem por objetivo a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios:

VIII - recuperação de áreas degradadas

Art. 4º - A Política Nacional do Meio Ambiente visará:

VI - à preservação e restauração dos recursos ambientais com vistas à sua utilização racional e disponibilidade permanente, concorrendo para a manutenção do equilíbrio ecológico propício à vida;

O Programa Nacional de Florestas (PNF), por sua vez, criado pelo Decreto nº 3.420,

de 20 de abril de 2000, em seu artigo segundo enaltece os seguintes objetivos:

Art. 2º O PNF tem os seguintes objetivos:

II - fomentar as atividades de reflorestamento, notadamente em pequenas propriedades rurais;

III - recuperar florestas de preservação permanente, de reserva legal e áreas alteradas;

Em complementação, a Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, trata sobre o tema em diversos segmentos, podendo-se citar os artigos 1º-A, 7º, 17, 41, 44, 46, 51, 54, 58, 61-A, 64, 65 e 66, sobre ações organizadas entre o setor público e a sociedade civil para fomentar a recuperação de áreas degradadas.

Por fim, ainda na mesma legislação acima citada, o Ministério do Meio Ambiente tem como um de seus objetivos a promoção de recuperação de áreas degradadas, com ênfase nas APPs e nas RLs, destacando-se as seguintes ações: (1) Implementar novos Centros de Referência em Recuperação de Áreas Degradadas (CRADs) nos biomas brasileiros; (2) Estabelecer métodos de recuperação de áreas degradadas para os biomas e (3) Instituir plano nacional de recuperação de áreas degradadas e restauração da paisagem.

A título de exemplificação da atual situação, conforme dados da Global Forest Watch (2020), o Brasil perdeu 53,8 milhões de hectares de cobertura arbórea entre 2001 e 2018. Isso pressupõe uma redução de cerca de 10% da área florestal desde o ano 2000 e, nesse contexto, a Caatinga é um dos biomas onde historicamente mais tem havido perda de cobertura vegetal, sendo o sobrepastoreio e a extração contínua de produtos florestais para diversos fins os mais importantes motores de perturbação crônica que, além de modificarem a estrutura da vegetação, podem levar à extinção local de uma série de espécies (MORO et al., 2016; RIBEIRO et al., 2015), o que também ameaça a população que vive nesse bioma, de forma direta e indireta, sendo portanto urgente a tomada de medidas para evitar danos ainda maiores do que os que já existem e os que são previstos para o futuro.

A Caatinga é um bioma com ocorrência exclusiva no Brasil, situando-se majoritariamente na Região Nordeste, com uma pequena presença na Região Sudeste, no norte de Minas Gerais, conforme se observa na Figura 1, totalizando 734 mil km², o que equivale a cerca de 10% do território nacional (SILVA et al., 2004). O clima semiárido predomina, observando-se uma incidência de menos de 800mm de precipitação por ano, classificando-se como Savana Estépica (VELOSO et al., 1991), contudo, em cenário internacional, venha se considerando como parte das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas - STDF (OLIVEIRA FILHO et al., 2006; PENNINGTON et al., 2000; PRADO, 2000).

No que tange aos processos de modificação trazidos pelo desmatamento, a Caatinga

enquadra-se como um dos biomas mais degradados do Brasil, ficando atrás da Floresta Atlântica e do Cerrado (MYERS et al, 2000). Acredita-se que boa parte da cobertura de vegetação, cerca de 50%, tenha sofrido alguma espécie de modificação devido a ações de cunho econômico. Contudo, esse percentual que demonstra, aparentemente, uma integridade estrutural razoável do bioma, acaba por esconder um efeito oculto, visível apenas quando se verifica o padrão de distribuição dessas áreas preservadas e se constata o seu elevado grau de fragmentação. Isso acaba por deixar os remanescentes atuais fortemente vulneráveis à pressão antropogênica (ANTONGIOVANNI, VENTICINQUE e FONSECA, 2018).

Figura 1: Bioma da Caatinga



Fonte: Mapbiomas (2021).

Devido a essas alterações narradas, pelas quais vêm passando a Caatinga, a desertificação já se encontra em nível avançado em grandes extensões, existindo, portanto, uma conexão entre o processo de degradação, a vegetação e os solos, onde a diminuição da cobertura vegetal por longos períodos aumenta os processos erosivos e deteriora as propriedades físicas,

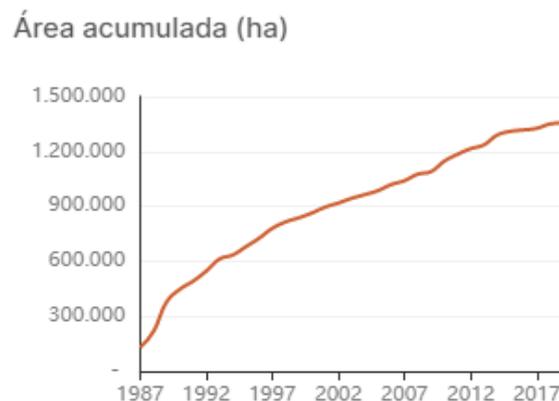
químicas e biológicas do solo (CCD, 1995). Conforme elabora Gariglio et al. (2010), esse processo tem se intensificado devido a fatores como o desmatamento, o uso inadequado do solo e as mudanças climáticas, resultando na degradação do solo e na perda de biodiversidade. Segundo estudos recentes, cerca de 60% do território da Caatinga apresenta algum nível de degradação, com áreas críticas especialmente no estado do Ceará e no semiárido da Bahia (MMA, 2017). A desertificação na Caatinga compromete não apenas o ecossistema, mas também as comunidades locais que dependem dos recursos naturais para sua subsistência (SILVA et al., 2016).

Em um cenário nacional, oficialmente a área propensa a ocorrência da desertificação abrange 1.338.076 km² e 1.482 municípios, onde habitam mais de 30 milhões de pessoas. No caso do Estado da Paraíba, o número é de 46.004 km², que abarca 208 municípios (BRASIL, 2004). Há de se destacar a região do Cariri Paraibano por apresentar altos níveis de desertificação, dada a rarefação ou ausência absoluta de cobertura vegetal (SOUZA, et al., 2011).

Destaca-se que a Paraíba representa bem a flora da Caatinga, visto que boa parte do seu território é dominado pelo clima semiárido e seus terrenos pertencem ao complexo cristalino (ARAÚJO et al., 2005), atributos físicos tais que condicionam o surgimento da vegetação característica do bioma.

Outro atributo importante a se destacar é o histórico de desmatamento sofrido pelo bioma no Estado da Paraíba – Figura 2. De acordo com dados do projeto MapBiomias (2021), a título de exemplificação, a caatinga paraibana sofreu uma perda de cerca de 2.700 hectares de área de cobertura vegetal só no ano de 2020. O total acumulado, contabilizado desde o ano de 1987 ultrapassa a marca de 1.200.000 hectares.

Figura 2: Área desmatada acumulada no Estado da Paraíba 1987 - 2017



Fonte: Mapbiomas (2021).

Conhecendo as características ambientais do local da pesquisa, uma técnica eleita para testar os resultados é a nucleação, a qual consiste no desenvolvimento de “ilhas” de vegetação formada por espécies dotadas de condições ecológicas para promover uma melhora significativa do ambiente, facilitando, então, a ocupação da área por outras espécies. (EMBRAPA, 2021.)

Segundo Reis et al. (2014) a técnica de nucleação funciona como uma estratégia eficaz para a restauração ecológica de áreas degradadas. A nucleação envolve a criação de pequenos núcleos de vegetação que facilitam a regeneração natural, promovendo interações ecológicas e processos sucessionais. A técnica é destacada por seu baixo custo e adaptabilidade a diferentes contextos ambientais, proporcionando uma recuperação mais resiliente e sustentável dos ecossistemas. A nucleação também aumenta a heterogeneidade espacial e temporal, essencial para a recuperação de áreas degradadas. As conclusões do estudo indicaram que a nucleação é uma abordagem promissora para a restauração ecológica, pois permite a formação de comunidades vegetacionais funcionais e a integração das áreas restauradas com a paisagem circundante, promovendo a conectividade ecológica e a resiliência dos ecossistemas (REIS et al., 2014).

Em função do contexto anterior, recuperar essas áreas degradadas se constitui um grande desafio, tanto do ponto de vista do conhecimento sobre as espécies a serem reintroduzidas, quanto da diversidade de ambientes a serem recuperados, assim como as questões financeiras relacionadas a essa intervenção, como preconiza, entre outros documentos, o PAN-Brasil (2004). Dentre os desafios mencionados, conhecer as características ambientais das áreas a serem recuperadas é fundamental para que sejam aplicadas técnicas ecologicamente corretas, com o menor custo possível.

Conforme enuncia Martins et al. (2012), a técnica de nucleação se mostra interessante, visto que as espécies eleitas para inaugurar a semeadura, irão modificar o ambiente de forma a torná-lo mais tolerável para outras mais exigentes no processo de sucessão ecológica. As espécies facilitadoras têm o papel de desencadear o processo de sucessão ecológica por mecanismos e interações tanto com fatores abióticos quanto bióticos. A título de exemplificação, algumas espécies de Leguminosas estabelecem uma simbiose com bactérias fixadoras do nitrogênio atmosférico, o que faz com que a qualidade química do solo o torne mais fértil. Entre outros benefícios, as plantas facilitadoras ainda podem promover a cobertura do solo exposto, reduzindo assim a incidência de radiação, equilibrando as oscilações de temperatura e conservando a umidade na superfície do solo, o fornecimento de frutos, abrigo e poleiros para a fauna (MARTINS et al., 2012).

Como dito, para a tarefa pretendida nesse trabalho, selecionou-se as espécies: *Jatropha mollissima*, *Cenostigma pyramidale* e *Bauhinia cheilantha*, cujas características são abordadas em seguida.

Jatropha mollissima, conhecida como pinhão-bravo, é uma planta endêmica do semiárido nordestino do Brasil. Adaptada às condições áridas da Caatinga, essa espécie é resistente à seca e desempenha um papel crucial na recuperação de áreas degradadas. Suas adaptações ecológicas incluem a capacidade de crescer em solos pobres e resistir a longos períodos de estiagem. A planta é importante para a estabilização do solo e a prevenção da erosão, contribuindo para a manutenção da biodiversidade local (SANTOS et al., 2005; NEVES et al., 2010; QUEIROZ et al., 2013).

O cultivo do pinhão-bravo envolve a coleta de sementes durante a estação seca e a semeadura no início da estação chuvosa. As sementes mostram melhor germinação em temperaturas entre 25-30°C. As mudas requerem solo bem drenado e exposição solar direta. Técnicas de cultivo sustentável são essenciais para garantir o crescimento adequado e a longevidade das plantas, além de promover a regeneração de ecossistemas degradados (VASCONCELOS et al., 2014).

Cenostigma pyramidale, também conhecida como “catingueira”, é uma espécie arbórea pioneira de médio porte pertencente à família Fabaceae, endêmica da região semiárida do nordeste do Brasil. Esta espécie possui ampla distribuição na Caatinga, sendo conhecida por sua diversidade de usos potenciais, incluindo madeira e carvão, replantio de áreas degradadas e sistemas agroflorestais (Maia, 2012). A catingueira é altamente resistente à seca e é excelente para projetos de reflorestamento em sua região nativa. As plantas jovens estabelecem-se bem e crescem rapidamente. Elas também regeneram bem após serem cortadas ou capinadas, mas não toleram fogo. Para o cultivo da catingueira, é recomendado semear suas sementes diretamente no local desejado ou utilizar mudas jovens. (Lorenzi, 2009).

Esta espécie está presente em todos os estágios de sucessão da Caatinga, desde a fase inicial até a fase tardia, sendo uma das principais espécies encontradas em áreas de vegetação arbórea densa. Suas folhas compostas, com 5-11 folíolos, florescem durante quatro meses na estação chuvosa (Cabral, Sampaio & Almeida-Cortez, 2013).

Bauhinia cheilantha, conhecida popularmente como “pata-de-vaca” ou “mororó”, é uma espécie de árvore nativa da região Nordeste do Brasil, especialmente adaptada ao bioma Caatinga. Esta planta perene pode atingir até 6 metros de altura e possui folhas bilobadas, que ajudam na minimização da perda de água por transpiração. As flores são geralmente brancas ou rosadas, atraindo polinizadores, o que é essencial para a reprodução da espécie (GBIF, 2023).

Para o plantio do mororó, recomenda-se a escarificação das sementes para facilitar a germinação. O solo deve ser bem drenado e enriquecido com matéria orgânica para melhorar a retenção de nutrientes. O plantio deve ser realizado no início da estação chuvosa para garantir a umidade adequada ao desenvolvimento das mudas (GBIF, 2023).

A técnica destacada para a efetivação desses núcleos é a dispersão aérea de sementes, proporcionando uma heterogeneidade de espécies na formação desses núcleos. Além da justificativa do nível de controle e rapidez em se replicar uma distribuição semelhante às áreas que melhor representam preservação do mesmo bioma, há de se levar em conta os custos financeiros envolvidos nessa técnica, quando comparado com as demais, além da necessidade mínima de manejo e economia de tempo envolvidos no processo.

Nesse aspecto, adaptando o raciocínio de Magnago et al (2012) sobre processos sucessionais na Mata Atlântica, visto a insuficiência de conteúdo relativo a metodologias restaurativas da Caatinga, a dispersão aérea de sementes visa suprir deficiências relacionadas a chuva de sementes. Isso se justifica pelo fato de que chuvas de sementes por processos naturais, dificilmente ocorreriam em áreas degradadas com características de desertificação, de maneira a proceder com a formação de bancos de sementes, dada a rarefação ou mesmo ausência de cobertura vegetal nesse tipo de ambiente com degradação intensa.

A dispersão aérea, na modalidade proposta, ainda conta com uma vantagem de proporcionar uma dispersão aleatória no quesito da diversidade de espécies, incorrendo em uma situação de aleatoriedade similar a encontrada nos processos de dispersão naturais. Essa característica permite a formação de um banco de sementes com grupos sucessionais distintos.

Apesar das sementes de plantas nativas da Caatinga serem dotadas de adaptações que permitam um maior sucesso de germinação e estabelecimento de espécimes viáveis (SOUZA, 2020), a técnica de peletização de sementes se mostra uma opção relevante para promover uma maximização de tolerância contra os fatores climáticos adversos, no sentido de minimizar o estresse hídrico no período de germinação e estabelecimento da plântula.

De forma a enriquecer o debate acerca da peletização, elenca-se o estudo de Santos (2016), o qual aborda a técnica de peletização de sementes florestais, visando uniformizar tamanhos e formatos das sementes para facilitar as técnicas de plantio e eficiência em projetos de restauração ecológica. A principal ideia do trabalho é destacar os benefícios e desafios da peletização de sementes florestais no Brasil, uma técnica que, apesar de promissora, ainda é pouco utilizada devido ao alto custo e à falta de tradição em semeadura direta com espécies florestais. A metodologia utilizada no estudo envolve a revisão de literatura sobre peletização de sementes, apresentando tanto estudos pioneiros quanto recentes. O trabalho discute

diferentes materiais e métodos empregados na peletização, como o uso de betoneiras e pistolas de pintura para aplicação de cimentantes, bem como os benefícios e desvantagens associados ao processo. Além disso, são revisados estudos de caso de peletização em espécies florestais nativas e exóticas, destacando as técnicas e resultados obtidos em cada caso (Santos, 2016).

Os resultados indicam que a peletização de sementes oferece várias vantagens, incluindo a incorporação de produtos fitossanitários, redução de poeira e inalação de agrotóxicos pelos operadores, e facilitação no plantio das sementes. No entanto, a técnica também apresenta desafios, como o custo elevado e a necessidade de equipamentos específicos. Estudos de caso mostraram sucesso na utilização de sementes peletizadas em projetos de restauração ecológica, como na Serra do Mar em Cubatão (SP), onde espécies como *Tibouchina pulchra* apresentaram melhor desempenho com a técnica (Santos, 2016).

Outro fenômeno natural que justifica a utilização de *pellets* é a predação de sementes, como bem explana Neves e Viana (2008) em um ensaio sobre a dispersão e predação de sementes de algumas espécies nativas da Caatinga, inclusive uma delas (*Jatropha mollissima*) eleita para figurar neste estudo. No processo de peletização, além da proteção mecânica, podem ser incluídas substâncias que tornem as sementes menos atraentes à predação, funcionando como repelentes. Um bom exemplo para essa função é o eugenol, encontrado no Cravo-da-Índia (*Syzygium aromaticum*). Uma terceira justificativa para o uso de tal técnica vem da mecânica adotada neste estudo para a dispersão, em outras palavras o encapsulamento de sementes tem uma função de uniformizar a massa e forma das sementes, com o intuito de aprimorar a aerodinâmica e garantir um máximo controle da dispersão.

Um levantamento realizado pela Avaliação dos Recursos Florestais (FAO, 2015) mostrou uma perda de florestas, em nível global, na ordem de 3,3 milhões de hectares por ano entre 2010 e 2015. Outro documento editado em 2014 pela Organização das Nações Unidas – ONU – declarou a necessidade de se restaurar 350 milhões de hectares de florestas degradadas até 2030 no intuito de mitigar os efeitos das alterações climáticas (NAÇÕES UNIDAS, 2014).

Um dos entraves fundamentais no que diz respeito à recuperação florestal de áreas degradadas ainda recai no custo das operações. O plantio de mudas é, de longe, a técnica de reflorestamento mais utilizada, uma vez que oferece maior probabilidade de sucesso. Contudo, em alguns casos, métodos de semeadura direta, onde pode se incluir a dispersão aérea, são preferíveis por razões econômicas (ORTOLANI et al., 2015).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de tecnologia para dispersão aérea de sementes que se agregue aos métodos de regeneração da cobertura vegetal, minimizando tanto os custos, quanto o tempo dessas operações.

A semeadura aérea com intuito de reflorestamento não é nenhuma novidade, já sendo utilizada por muitos anos. Por exemplo, no Canadá, nas décadas de 1960 e 1970, a semeadura aérea direta, com uso de aeronaves de asa fixa ou helicópteros foi a principal forma de reflorestamento para aproximadamente 50% da área total semeada (WALDRON, 1973). Ainda a título exemplificativo, na década de 1960, a semeadura aérea de *Pinus Radiata* na taxa de 2,24 kg/ha foi usada em combinação com a regeneração natural nas florestas Kaingaroa da Nova Zelândia. Nos EUA, a dispersão aérea foi aplicada com sucesso em áreas após tempestades ou incêndios onde o acesso de veículos terrestres era inadequado devido a tocos e outros obstáculos. A China tem uma história de mais de 55 anos realizando dispersão aérea de sementes e, em 2012, foram realizados trabalhos numa área de 136 400 hectares. (NOVIKOV e ERSSON, 2019).

Com base no exposto até o momento, reitera-se que métodos tradicionais de recuperação de áreas desmatadas exigem um elevado custo no que tange a revegetação. No contexto descrito, esta pesquisa busca uma solução de inovação tecnológica baseada em uma metodologia que emprega uma ferramenta-modelo possível de ser empregada para recuperação de áreas degradadas no bioma Caatinga.

O reflorestamento de áreas degradadas é uma prática essencial para a recuperação ambiental, especialmente em ambientes como a Caatinga e outras terras secas. Diversos estudos têm investigado técnicas e estratégias eficazes para promover a regeneração dessas áreas, com foco em aumentar a taxa de sobrevivência, aumentando áreas com cobertura vegetal. Nesse contexto, passa-se a analisar a literatura de modo a consubstanciar esta pesquisa.

2.1 Reflorestamento em Terras Secas (drylands)

Como a pesquisa sobre regeneração de áreas degradadas na Caatinga é muito incipiente, o levantamento de textos científicos publicados fora estendido para regiões denominadas de *drylands* em outros países, de modo a fundamentar o trabalho aqui desenvolvido. Outrossim, levantamentos sobre a técnica de nucleação, assim com sobre custos inerentes às atividades de reflorestamento foram incluídos nesse referencial.

A revisão de Harper et al. (2017) aborda as opções de reflorestamento para terras agrícolas de sequeiro no sudoeste da Austrália. O estudo foca na integração de árvores em sistemas agrícolas com precipitação anual de 300–600 mm, visando combater problemas de degradação do solo, como salinização e erosão eólica. Tradicionais abordagens florestais, como a produção de madeira para celulose e serraria, têm sido limitadas devido às taxas modestas de crescimento das árvores e altos custos de transporte. Alternativas novas e viáveis incluem

projetos de sequestro de carbono e bioenergia, bem como restauração da biodiversidade. A pesquisa destaca que a mitigação do carbono representa uma das poucas opções lucrativas para a gestão da salinidade na região. As abordagens desenvolvidas para o reflorestamento de terras agrícolas de sequeiro na Austrália ocidental podem ser aplicáveis em outras regiões áridas, especialmente com o interesse crescente em utilizar o setor de terras para atingir metas de mitigação climática (HARPER et al., 2017).

O estudo publicado por Albrecht et al. (2021) examina a sobrevivência, crescimento e recrutamento de espécies ao longo de uma sequência cronológica de plantio de 33 anos no reflorestamento em terras secas do Vale do Rio Grande, no sul do Texas. A pesquisa abrangeu mais de 50 espécies nativas de árvores e arbustos e envolveu a análise de mais de 5.223 caules de 4.606 indivíduos. O estudo constatou que taxas de mortalidade das espécies plantadas se estabilizam entre 7 e 15 anos após o plantio, com um pequeno número de espécies, principalmente árvores fixadoras de nitrogênio com raízes profundas, persistindo além de 15 anos. A biomassa acima do solo acumulou-se a uma taxa média de $1,41 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, comparada a $0,35 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ para campos deixados em pousio. O estudo também identificou que gramíneas exóticas invasoras representam um desafio significativo à sustentabilidade a longo prazo das florestas plantadas, devido a supressão do recrutamento de plântulas nativas. Esses achados sugerem a necessidade de modificar metodologias de restauração, incluindo a avaliação de custos e benefícios de maior investimento inicial no estabelecimento de plântulas ou plantio em fases (ALBRECHT et al., 2021).

Vallejo et al. (2012) discutem abordagens de restauração para adaptação às mudanças climáticas em ecossistemas áridos. O estudo analisa os desafios de reflorestamento em ecossistemas de terras áridas, onde a seca e a baixa produtividade do solo interagem para agravar o estresse hídrico das mudas transplantadas. A degradação do solo nessas áreas, especialmente a desertificação, reduz a disponibilidade de água e a produtividade do solo. Com as mudanças climáticas, projeta-se um aumento na intensidade das secas e regimes de incêndios mais severos, tornando crucial o desenvolvimento de tecnologias de plantio que superem o choque do transplante e períodos adversos relacionados principalmente às limitações de água. As abordagens sugeridas incluem a seleção de espécies vegetais, técnicas de viveiro aprimoradas e técnicas de plantio melhoradas para otimizar o uso da água e a resiliência ao fogo. O estudo enfatiza a importância de técnicas adaptativas de restauração, como a melhoria da qualidade das plantas, técnicas de otimização do uso da chuva em plantações e a exploração de espécies nativas resistentes ao fogo e eficientes no uso da água (VALLEJO et al., 2012).

O artigo de Newton et al. (2012) explora a restauração de paisagens florestais em terras

áridas da América Latina, com o objetivo de beneficiar tanto a biodiversidade quanto o bem-estar humano. O estudo identifica quatro princípios fundamentais da restauração de paisagens florestais (FLR) e avalia a aplicação prática desses princípios em seis paisagens florestais secas na América Latina. A pesquisa destacou que FLR pode ser alcançada através de abordagens de restauração passiva e ativa, sendo eficaz em termos de proporcionar benefícios à biodiversidade e à sociedade humana, por meio do aumento da provisão de serviços ecossistêmicos. No entanto, a implementação de FLR enfrenta desafios significativos, como a dificuldade de engajar comunidades locais e a falta de um ambiente institucional e regulatório apropriado. A pesquisa conclui que para a implementação bem-sucedida de FLR, é necessário desenvolver novas alianças colaborativas entre as partes interessadas, capacitar as comunidades locais e criar um contexto político que permita a participação ativa das pessoas no processo de tomada de decisão (NEWTON et al., 2012).

Kribeche et al. (2012) investigaram o impacto da heterogeneidade espacial da paisagem e das técnicas de reflorestamento no sucesso da restauração de áreas secas no sudeste da Espanha. O estudo foi realizado em um projeto de restauração implementado pelo Serviço Florestal Regional de Valência em 2003, em uma bacia hidrográfica de 25 hectares no município de Albaterra. As técnicas de restauração incluíram a introdução de espécies de árvores e arbustos de crescimento rápido, tratamentos de conservação de solo (como microbacias de coleta de água e aplicação de compostagem), e proteção das mudas com abrigos tubulares e redes. A sobrevivência e o crescimento das mudas foram avaliados, assim como as taxas de erosão do solo entre 2005 e 2009. Os resultados mostraram que a unidade sul, que recebeu os tratamentos mais intensivos, apresentou as maiores taxas de sobrevivência e crescimento das plantas, embora também tenha registrado as maiores taxas de perda de solo. A aplicação de técnicas adaptativas de restauração, ajustadas às condições locais, demonstrou ser essencial para melhorar a sobrevivência das plantas e a conservação do solo (KRIBECHE et al., 2012).

O trabalho de Piñeiro et al. (2013) apresenta uma meta-análise de experimentos de campo sobre o uso de eco tecnologias na restauração de terras secas degradadas. Os autores analisaram a eficácia de diferentes técnicas eco tecnológicas, incluindo micorrização (em viveiro, uso de protetores de árvores, emendas orgânicas, hidrogéis e a combinação de micorrização e emendas orgânicas, na sobrevivência e crescimento de mudas de espécies lenhosas. Foram avaliados 1.207 casos de estudo de 88 estudos conduzidos em 14 países. Os resultados indicaram que a micorrização em viveiro, isolada ou combinada com emendas orgânicas, e o uso de protetores de árvores foram os tratamentos mais eficazes para aumentar tanto a sobrevivência quanto o crescimento das mudas plantadas. Por outro lado, o uso de

emendas orgânicas isoladas não aumentou a sobrevivência das mudas. O estudo conclui que a aplicação de técnicas eco tecnológicas pode ser uma ferramenta eficaz para a restauração de terras secas degradadas, proporcionando diretrizes valiosas para pesquisadores e praticantes envolvidos na restauração ecológica (PIÑEIRO et al., 2013).

A pesquisa conduzida por Cortina et al. (2011) explora as medidas de restauração ecológica para combater a desertificação em zonas áridas, que cobrem mais de 40% da superfície terrestre e sustentam mais de um terço da população global. Os autores discutem a eficácia das técnicas tradicionais e novas tecnologias no restabelecimento de paisagens funcionais e autossustentáveis em condições semiáridas. O estudo identifica que a falta de avaliação integrada e monitoramento das ações de restauração, junto com o entendimento insuficiente da ecologia das espécies e dinâmicas comunitárias, contribui para o sucesso limitado dos programas de restauração em larga escala. Propõem que a restauração ecológica deve adotar princípios de gestão adaptativa, participativa e integrada, incorporando serviços ecossistêmicos como base para definir metas de restauração e avaliar ações. Além disso, sugerem que redes de projetos piloto e de demonstração podem promover a troca de conhecimento e práticas de gestão eficazes (CORTINA et al., 2011).

Reij et al. (2013) apresentaram um estudo abrangente sobre o sucesso da restauração de terras áridas no Sahel e no Chifre da África, enfatizando os fatores que contribuíram para a efetividade desses projetos. A pesquisa identifica as práticas de manejo natural regenerado por agricultores como uma estratégia fundamental para reverter a degradação da terra, destacando a regeneração natural de árvores e arbustos em terras agrícolas. O estudo também avalia as iniciativas locais e internacionais, como a Grande Muralha Verde e a Iniciativa Africana de Restauração da Paisagem Florestal (AFR100), que têm sido cruciais para promover a restauração em grande escala. A análise dos casos de sucesso sugere que a participação comunitária, o fortalecimento das capacidades locais e a integração de técnicas de manejo adaptativo são essenciais para o sucesso a longo prazo. O artigo conclui que a restauração das terras áridas não só melhora a resiliência ecológica e a segurança alimentar, mas também oferece benefícios socioeconômicos significativos às comunidades locais (REIJ et al., 2013).

Chirino et al. (2009) no livro "Forest Management" abordaram a restauração ecológica em terras áridas degradadas, destacando a necessidade de melhorar a qualidade das mudas e as condições do solo. O texto apresenta técnicas inovadoras de viveiro e campo desenvolvidas pelo programa de restauração florestal da Fundação CEAM e pelo grupo de manejo de ecossistemas e biodiversidade da Universidade de Alicante. Entre as técnicas discutidas estão o uso de recipientes profundos para mudas, hidrogéis para aumentar a capacidade de retenção

de água no substrato, prévio condicionamento à seca para induzir resistência à seca e técnicas de fertilização adaptadas às condições específicas do campo. O estudo destaca a importância de tecnologias adaptativas e investimentos tecnológicos na restauração florestal para garantir melhores taxas de sobrevivência e crescimento das mudas e promover a recuperação gradual dos ecossistemas. Além disso, o projeto de demonstração em áreas semiáridas afetadas pela desertificação em Albaterra (Espanha) é apresentado como um exemplo de implementação dessas técnicas inovadoras, mostrando resultados positivos na sobrevivência e crescimento das mudas (CHIRINO et al., 2009).

O livro editado por Newton e Tejedor (2011), *Principles and Practice of Forest Landscape Restoration: Case studies from the drylands of Latin America*, oferece uma análise abrangente das práticas e princípios de restauração de paisagens florestais em terras áridas da América Latina. A obra reúne estudos de caso de diferentes regiões, incluindo México, Chile e Argentina, abordando a fragmentação florestal, a perda de biodiversidade e a degradação do solo. Esse trabalho destaca a importância da restauração ecológica para a conservação da biodiversidade e o desenvolvimento rural sustentável. Entre os princípios discutidos estão a necessidade de restaurar não apenas a cobertura florestal, mas também os processos ecológicos e os serviços ecossistêmicos. As técnicas abordadas incluem tanto a restauração passiva quanto ativa, enfatizando a importância da participação comunitária e a criação de políticas públicas que suportem iniciativas de restauração em larga escala. A obra oferece uma visão detalhada sobre como os princípios de restauração de paisagens florestais podem ser implementados na prática, contribuindo para a resiliência ecológica e a melhoria do bem-estar humano em áreas degradadas (NEWTON e TEJEDOR, 2011).

Del Campo et al. (2021) avaliam a falha de reflorestamento em escala de projeto, investigando as margens para melhorias técnicas sob condições adversas em uma área mediterrânea seca. O estudo foi realizado em "La Muela de Cortes", um florestamento público no município de Cortes de Pallás, Espanha, entre 2007 e 2008, em condições de extrema seca. Foram testadas várias espécies e tratamentos de cultivo, e a mortalidade das plantações foi alta, variando significativamente entre espécies e locais. Os resultados mostraram que, a curto prazo, a umidade do solo e as condições meteorológicas durante a estação de plantio foram fatores críticos para a sobrevivência pós-verão. A longo prazo, variáveis ambientais, como a qualidade do local e a ocorrência de secas meteorológicas, foram mais importantes para a sobrevivência das plantas. Técnicas como a seleção de espécies adequadas, preparação do solo e escolha da época de plantio mostraram ser cruciais para melhorar o desempenho das plantações. O estudo conclui que a melhoria das práticas de reflorestamento pode aumentar a resiliência e o sucesso

das plantações em regiões mediterrâneas secas (DEL CAMPO et al., 2021).

Grossnickle e Ivetić (2017), revisaram o desempenho em campo da sementeira direta na restauração florestal. Embora essa prática tenha sido amplamente substituída pela produção de mudas de alta qualidade em programas de regeneração florestal nos países desenvolvidos, a sementeira direta está sendo reconsiderada devido à crescente necessidade de restauração florestal em larga escala em países em desenvolvimento, e também devido às mudanças climáticas globais. A revisão destaca as vantagens da sementeira direta, como a rápida cobertura de grandes áreas perturbadas a um custo relativamente baixo. No entanto, os índices de estabelecimento de mudas são geralmente baixos devido às condições do local, predação de sementes e competição vegetativa. Para melhorar a eficácia, os autores discutem práticas operacionais e novas técnicas, como a criação de microsítios favoráveis e métodos para minimizar a predação de sementes. A revisão conclui que a sementeira direta pode ser uma opção viável para a restauração florestal, especialmente em áreas de difícil acesso e em programas com orçamento limitado (GROSSNICKLE e IVETIĆ, 2017).

Navarro Cerrillo et al. (2000) analisaram as principais lições aprendidas e desafios enfrentados na restauração de áreas florestais degradadas na Península Ibérica. O artigo foca na importância de entender as condições ambientais e ecológicas locais para o sucesso da restauração. Destaca-se a seleção apropriada de espécies, a preparação do solo, técnicas de plantio e cuidados pós-plantio como fatores críticos. A pesquisa conclui que a restauração em áreas mediterrâneas deve ser abordada de forma holística, integrando práticas de manejo sustentáveis e considerando os serviços ecossistêmicos, como a conservação da biodiversidade, regulação do ciclo hidrológico e mitigação das mudanças climáticas. O artigo também enfatiza a necessidade de monitoramento contínuo e adaptativo das iniciativas de restauração para assegurar o sucesso a longo prazo (NAVARRO CERRILLO et al., 2000).

Pisetta Raupp et al. (2020) investigaram a eficácia da sementeira direta em comparação com o plantio de mudas para a restauração de florestas e savanas no Brasil. Os autores analisaram os custos de produção de sementes para 50 espécies de árvores florestais e de savana, bem como os custos de estabelecimento de mudas de 57 espécies por meio de sementeira direta. A pesquisa revelou que a sementeira direta é significativamente mais econômica do que o plantio de mudas, com custos variando entre 30% e 38% do custo do plantio de mudas. Além disso, a sementeira direta permite a manipulação de espécies de diferentes estágios sucessionais em altas densidades. No entanto, os desafios incluem baixas taxas de germinação e a impossibilidade de armazenar sementes recalcitrantes. A pesquisa sugere que a sementeira direta, integrada com plantio esporádico de mudas, pode ser uma estratégia eficiente para

restauração em grande escala quando a probabilidade de colonização natural é baixa (PISETTA RAUPP et al., 2020).

O artigo de Stamatopoulos et al. (2024) revisa o uso de veículos aéreos não tripulados (VANTs) na semeadura e monitoramento do reflorestamento. A pesquisa destaca a importância dos VANTs na regeneração de áreas remotas, proporcionando altas taxas de deposição de sementes, boas taxas de germinação e redução dos custos de mão-de-obra. Os VANTs equipados com sensores adequados podem realizar análises pós-plantio para avaliar o sucesso das sementes, desde os estágios iniciais de germinação até o desenvolvimento do dossel. A integração da inteligência artificial, especialmente algoritmos de aprendizado de máquina, melhora a velocidade, precisão e confiabilidade na caracterização de parâmetros das árvores. A revisão abrange o uso da tecnologia VANT na implantação de sementes e monitoramento do reflorestamento, explorando tendências e desafios futuros. A análise conclui que a adoção de VANTs pode acelerar significativamente os esforços de reflorestamento, especialmente em paisagens remotas e complexas (STAMATOPOULOS et al., 2024).

Ferreira et al. (2022) trouxeram investigações sobre os principais filtros ecológicos que podem inibir o sucesso da semeadura direta utilizando a espécie *Syagrus coronata*, uma palmeira de grande importância ecológica e econômica para a região semiárida do Brasil. Foram testadas duas hipóteses: (1) o habitat manejado (pastagem) e o habitat natural (vegetação de caatinga) apresentam diferenças no destino das sementes; e (2) frutos despulpados terão maior sucesso germinativo comparado aos frutos com polpa. O destino das sementes foi monitorado ao longo de dois anos, com 800 frutos enterrados em transectos de 300 metros, metade com tratamento de despulpamento. A maior sobrevivência de sementes ocorreu no segundo ano, associado à maior pluviosidade. A remoção da polpa facilitou a germinação e reduziu a predação por insetos, enquanto a desidratação foi a maior causa de mortalidade, especialmente no habitat manejado. O estudo conclui que a semeadura direta pode ser uma técnica viável para a restauração ecológica em áreas semiáridas, dependendo das condições do habitat e do manejo adequado das sementes (FERREIRA et al., 2022).

Pellizzaro et al. (2017) examinaram o estabelecimento em campo e o crescimento inicial de 75 espécies de árvores, arbustos e gramíneas nativas do Cerrado por meio da semeadura direta. Os experimentos foram conduzidos em quatro locais no Brasil Central ao longo de 2,5 anos. Das 75 espécies avaliadas, 62 conseguiram se estabelecer no campo, incluindo 42 espécies de árvores, 11 de arbustos e 9 de gramíneas. As taxas de emergência variaram, com 38 espécies apresentando taxas de emergência relativamente altas (acima de 10%) e 41 espécies apresentando altas taxas de sobrevivência (acima de 60%) no primeiro ano.

Espécies como *Andropogon fastigiatus*, *Aristida riparia*, *Schizachyrium sanguineum*, *Lepidaploa aurea*, *Stylosanthes capitata*, *Stylosanthes macrocephala*, *Achyrocline satureioides* e *Trachypogon spicatus* destacaram-se pelo sucesso no estabelecimento inicial, cobrindo até 30% do solo. O estudo conclui que a semeadura direta pode ser uma técnica eficaz e de baixo custo para a restauração de ecossistemas de Cerrado, proporcionando informações valiosas sobre a propagação e o estabelecimento de espécies nativas (PELLIZZARO et al., 2017).

Souza e Engel (2023) revisaram os avanços, desafios e direções futuras para a restauração ecológica por meio da semeadura direta de árvores no Brasil. A pesquisa analisa dados de 53 experimentos de campo realizados no país para avaliar a viabilidade técnica e ecológica da semeadura direta como sistema de restauração florestal. Os resultados indicam que, apesar das taxas de estabelecimento e crescimento serem geralmente baixas, as taxas de sobrevivência são altas. A semeadura direta é considerada uma alternativa econômica à plantação de mudas criadas em viveiros, especialmente para restaurar grandes áreas com custos reduzidos. No entanto, para alcançar densidade satisfatória de mudas e cobertura do solo, é necessário usar uma grande quantidade de sementes viáveis. A escassez de sementes é uma limitação crítica para a aplicação em larga escala da técnica. Os autores sugerem que a semeadura direta deve ser usada como técnica complementar ao plantio de mudas em viveiros para aumentar a densidade de mudas e a diversidade de espécies (SOUZA e ENGEL, 2023).

Silva et al. (2020) compararam a semeadura direta e o plantio de mudas, utilizando fertilizantes de liberação lenta (SRF) e hidrogel, em espécies pioneiras no sudeste da Amazônia. Foram avaliadas *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* e *Senegalia polyphylla*, utilizando índices morfométricos como esbeltez do tronco e da copa para auxiliar na avaliação do crescimento. Os resultados mostraram que ambos os métodos promoveram bom crescimento, mas o plantio de mudas foi superior para *Senegalia*, enquanto *Schizolobium* não apresentou clareza estatística significativa entre os métodos. O uso de SRF promoveu os melhores resultados de crescimento, recomendando seu uso como insumo complementar. O estudo conclui que, apesar dos bons resultados da semeadura direta, o plantio de mudas pode ser mais eficaz dependendo das condições específicas e dos insumos utilizados (SILVA et al., 2020).

Jarrar et al. (2023) revisaram as tecnologias de aprimoramento de sementes (SETs) para restauração sustentável de terras áridas, com foco em revestimento e escarificação de sementes. O artigo discute como altas temperaturas, salinidade do solo, falta de água disponível e baixa fertilidade do solo são obstáculos para os esforços de restauração. Tecnologias como *priming*, revestimento e escarificação de sementes são destacadas como métodos para promover a germinação e o desenvolvimento das plantas em condições ambientais adversas. A revisão

classifica e avalia as técnicas de SETs, facilitando a tomada de decisão para adotar métodos adequados em ambientes de terras áridas, e sublinha os benefícios de tais tecnologias para superar desafios bióticos e abióticos na restauração ecológica. A pesquisa recomenda otimizar as SETs eficazes a longo prazo, integrando revestimento e escarificação para superar diferentes limitações e aplicando-as a misturas de sementes de várias espécies e tamanhos (JARRAR et al., 2023).

Freitas et al. (2019) avaliaram o sucesso da semeadura direta para a restauração de florestas tropicais ao longo de dez anos na bacia do rio Xingu, Mato Grosso, Brasil. O objetivo principal foi descrever as mudanças na estrutura da vegetação e na riqueza de espécies em florestas restauradas, comparando os métodos de semeadura direta, plantio de mudas e regeneração natural. Foram amostrados 72 locais de semeadura direta, três sites de plantio de mudas e seis sites de regeneração natural. A semeadura direta mostrou-se eficaz na formação de uma floresta estratificada com alta biomassa acima do solo e elevada densidade de plântulas e mudas. A estrutura das comunidades restauradas variou ao longo do tempo, influenciada por variáveis ambientais, como precipitação anual e teor de fósforo no solo. A semeadura direta promoveu uma estrutura mais semelhante à regeneração natural resiliente do que ao plantio de mudas (FREITAS et al., 2019).

Souza (2022) realizou uma análise bibliométrica global sobre a restauração florestal por semeadura direta, revisando 81 artigos revisados por pares que testaram essa técnica em experimentos de campo. A pesquisa destaca um aumento recente no número de publicações, com estudos concentrados principalmente no Brasil e nos Estados Unidos. Apesar do potencial da semeadura direta para reduzir os custos de restauração, a técnica ainda é pouco utilizada em larga escala devido a desafios como baixa emergência e estabelecimento de plântulas, além da dificuldade em obter grandes quantidades de sementes viáveis. A análise sugere que mais estudos são necessários para superar essas limitações e expandir a aplicação da semeadura direta, especialmente em regiões tropicais. A revisão também aponta a necessidade de monitoramento a longo prazo dos projetos de restauração para avaliar melhor os resultados e a eficácia da técnica (SOUZA, 2022).

O trabalho de Sampaio et al. (2019) avalia a eficácia da semeadura direta para restaurar savanas neotropicais dominadas por gramíneas invasoras C4 no Brasil Central. Foram realizados experimentos de restauração em 55 hectares de pastagens abandonadas, testando densidades de semeadura, preparo do solo e tipos de solo na cobertura de espécies nativas. A semeadura direta de gramíneas, arbustos e árvores nativas aumentou a cobertura nativa relativa, com melhores resultados em solos rochosos e maiores densidades de semeadura. Três anos após

a sementeira, a cobertura nativa relativa alcançou 34% em áreas com maior intensidade de preparo do solo. O estudo conclui que a sementeira direta pode estabelecer efetivamente muitas espécies de savana neotropical, mas ressalta a necessidade de melhorar os métodos de controle de gramíneas invasoras para alcançar as metas de restauração em larga escala (SAMPAIO et al., 2019).

Palma e Laurance (2015) revisaram o uso da sementeira direta e do plantio de mudas na restauração ecológica, explorando a eficácia e os custos dessas técnicas em 120 publicações científicas. A pesquisa conclui que, embora a sementeira direta utilize mais espécies que o plantio de mudas, apresenta menor taxa de sobrevivência. A disponibilidade de espécies é uma grande limitação para ambas as técnicas. O estudo destaca a necessidade de experimentos de restauração que considerem uma ampla gama de espécies e relatem detalhadamente os custos e prazos. Além disso, aponta a importância de considerar cenários futuros de mudanças climáticas que afetarão os esforços de restauração (PALMA e LAURANCE, 2015).

2.2 Reflorestamento na Caatinga

No que diz respeito aos trabalhos levantados sobre recuperação de áreas degradadas na Caatinga, com o mesmo intuito de referenciar este trabalho, colaciona-se os principais destaques disponíveis na literatura.

O estudo realizado por Lima et al. (2015) teve como objetivo avaliar a sobrevivência de seis espécies nativas da Caatinga utilizadas na recuperação de uma área degradada no Nordeste do Brasil. A pesquisa foi conduzida na cidade de Paulo Afonso, Bahia, em uma área indígena Truká-Tupã. Em março de 2014, foram plantadas 432 mudas de seis espécies arbóreas nativas: *Anadenanthera colubrina* (angico-de-caroco), *Caesalpinia ferrea* (pau-ferro), *Poincianella pyramidalis* (catingueira), *Hymenaea courbaril* (jatobá), *Schinopsis brasiliensis* (baraúna) e *Myracrodruon urundeuva* (aroeira-do-sertão). Após um ano, a taxa média de sobrevivência foi de 46,5%, com a espécie *Myracrodruon urundeuva* apresentando a maior taxa de sobrevivência (82,5%), enquanto *Hymenaea courbaril* e *Anadenanthera colubrina* tiveram as menores taxas (20,5% e 36,9%, respectivamente). Esses resultados destacam a necessidade de desenvolver estratégias mais eficazes para aumentar a resistência e a sobrevivência das mudas em projetos de recuperação na Caatinga (LIMA et al., 2015).

Dando continuidade aos esforços de revegetação na Caatinga, o estudo de Figueiredo et al. (2012) analisou a revegetação de áreas degradadas da Caatinga por meio do plantio de árvores nativas. Os pesquisadores plantaram mudas de três espécies nativas (*Poincianella pyramidalis*, *Mimosa tenuiflora* e *Cnidoscolus quercifolius*) em covas enriquecidas com esterco

e fertilizantes, utilizando um delineamento em blocos ao acaso. Após dois anos, a taxa de sobrevivência das árvores variou entre 72,5% e 95%, com *Mimosa tenuiflora* se destacando como a espécie mais promissora em termos de altura, diâmetro basal e cobertura de copa. Além disso, a cobertura herbácea sob a copa das árvores alcançou 53%, enquanto em áreas adjacentes não plantadas a cobertura foi de apenas 10%. Esses resultados demonstram que o plantio de árvores pode melhorar significativamente a cobertura do solo em áreas degradadas da Caatinga, contribuindo para a recuperação ambiental (FIGUEIREDO et al., 2012).

Avançando no entendimento das técnicas de revegetação, a pesquisa de Sales (2008) investiga métodos para a revegetação de áreas degradadas da Caatinga. O estudo foi conduzido na Fazenda NUPEARIDO/UFCG em Patos (PB) e avaliou dois métodos principais: a semeadura e o transplante de mudas de espécies nativas como *Mimosa tenuiflora*, *Caesalpinia pyramidalis*, *Anadenanthera macrocarpa* e *Tabebuia caraíba*. Foram utilizados dois experimentos: um que testou a adição de esterco bovino e a semeadura das espécies arbóreas, e outro que avaliou a adubação orgânica e o transplante de mudas. Os resultados mostraram que a adição de esterco e a semeadura não foram eficazes, com nenhuma plântula sobrevivendo por mais de um ano. O transplante de mudas de *Mimosa tenuiflora* foi o único método que apresentou algum sucesso, com uma taxa de sobrevivência de 36%. Conclui-se que o uso de matéria orgânica não promove a regeneração natural de espécies lenhosas, mas o transplante de mudas pode acelerar a revegetação (SALES, 2008).

O trabalho de conclusão de curso de Costa (2020) analisa o desenvolvimento inicial em campo de seis espécies arbóreas da Caatinga produzidas em diferentes recipientes. O estudo foi realizado em uma área degradada localizada em Currais Novos (RN) e teve como objetivo avaliar a sobrevivência e o crescimento inicial das espécies em dois tipos de recipientes: sacos de polietileno e cilindros de bambu. As espécies estudadas incluíram três pioneiras (*Erythrina velutina*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Cnidoscolus quercifolius*) e três não pioneiras (*Caesalpinia ferrea*, *Amburana cearensis*, *Aspidosperma pyrifolium*). Os resultados indicaram que as espécies produzidas em sacos de polietileno apresentaram melhor desempenho em termos de altura e diâmetro na base, bem como maior taxa de sobrevivência, quando comparadas às produzidas em cilindros de bambu. Conclui-se que o uso de recipientes adequados é crucial para o sucesso do desenvolvimento inicial e da sobrevivência de mudas em projetos de restauração ecológica na Caatinga (COSTA, 2020).

A dissertação de Figueiredo (2010) explora a revegetação de áreas antropizadas da Caatinga utilizando espécies nativas. O estudo foi realizado na Fazenda NUPEARIDO da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Patos-PB, e avaliou a sobrevivência e

o crescimento inicial de três espécies arbóreas nativas: *Caesalpinia pyramidalis* (catingueira), *Mimosa tenuiflora* (jurema preta) e *Cnidocolus phyllacanthus* (faveleira). Os resultados mostraram que a jurema preta teve o maior desempenho em termos de crescimento e sobrevivência, seguida pela faveleira e pela catingueira. O estudo também constatou que a introdução dessas espécies nativas ajudou a melhorar a cobertura vegetal do solo, sem interferir negativamente no estrato herbáceo, promovendo uma maior diversidade e produção de biomassa forrageira. Esses achados indicam que a revegetação com espécies nativas, associada à proteção contra pastejo e adubação adequada, pode acelerar a recuperação de áreas degradadas na Caatinga (FIGUEIREDO, 2010).

O artigo de Socolowski et al. (2021) apresenta as principais técnicas de restauração ecológica desenvolvidas para a Caatinga. O estudo aborda a necessidade de restaurar áreas degradadas impactadas por grandes obras de infraestrutura, como o projeto de transposição do Rio São Francisco. Foram desenvolvidas técnicas de nucleação de baixo custo e fácil implementação, incluindo a semeadura direta, transposição de solo e de galhos, e o uso de cercas de proteção para mudas plantadas. As técnicas visam reduzir custos, melhorar a sobrevivência das plântulas e resistir às pressões locais, como pastoreio e condições de seca. Os resultados preliminares são promissores, mas o monitoramento a longo prazo é necessário para fornecer evidências mais robustas de sua eficácia. A restauração da Caatinga representa um grande desafio científico e uma oportunidade de desenvolver novos métodos e técnicas de restauração ecológica (SOCOLÓWSKI et al., 2021).

O estudo realizado por Santos (2018) buscou desenvolver métodos de nucleação utilizando um mix de plantas xerófilas, especificamente espécies das famílias *Cactaceae* e *Euphorbiaceae*, para a recuperação de áreas em processo de desertificação no Seridó Paraibano. A pesquisa foi conduzida na Fazenda Agroecológica Gavião, localizada em Picuí-PB. As plantas selecionadas, incluindo xique-xique, facheiro, mandacaru, palma de espinho, maniçoba, aveloz e pinhão bravo, foram plantadas em três formatos de núcleos: Mandala, Transepto e Espiral. Cada núcleo teve um raio de 5 metros, totalizando 32 plantas, sendo quatro de cada espécie. O objetivo era avaliar a sobrevivência, brotação, floração, frutificação e produção de biomassa verde e seca dessas espécies (SANTOS, 2018).

Os resultados indicaram que as espécies de *Cactaceae*, como xique-xique e palma de espinho, apresentaram altos índices de sobrevivência, com destaque para o xique-xique que atingiu 100% de sobrevivência em todos os formatos de núcleos. No caso das *Euphorbiaceae*, o pinhão bravo teve uma taxa de sobrevivência significativa, especialmente no núcleo Mandala. Além disso, as médias de brotação foram superiores nos núcleos Transepto e Espiral para as

Cactaceae, e a floração do pinhão bravo foi estatisticamente superior no núcleo Mandala. Em termos de biomassa, apenas palma de espinho e mandacaru com espinho diferiram estatisticamente entre os núcleos, com o núcleo Espiral apresentando valores de massa seca superiores aos outros formatos (SANTOS, 2018).

As conclusões do estudo sugerem que as espécies xerófilas xique-xique, facheiro, palma de espinho e pinhão bravo podem ser eficazes para a recuperação de áreas em processo de desertificação devido ao seu alto percentual de sobrevivência. Essas espécies, dispostas em núcleos, podem colonizar áreas degradadas, interagindo com outras espécies e favorecendo o processo de sucessão ecológica. A técnica de nucleação, portanto, é considerada uma abordagem promissora e sustentável para a recuperação de ecossistemas degradados no semiárido brasileiro (SANTOS, 2018).

O estudo realizado por Gonçalves (2017) investiga diferentes técnicas de recuperação florestal em áreas perturbadas na Caatinga, Ceará, visando à conservação e restauração desse bioma ameaçado. A pesquisa foi conduzida nas Fazendas Triunfo e Não Me Deixes, onde foram implementados três experimentos principais: nucleação com poleiros (artificiais e naturais), plantio de mudas em diferentes tipos de solo e plantio de mudas sob o uso de bagana de carnaúba.

No primeiro experimento, foram instalados poleiros artificiais em duas fazendas, uma com entorno perturbado (Fazenda Triunfo) e outra com entorno conservado (Fazenda Não Me Deixes). Os resultados mostraram que a dispersão de sementes foi maior nos poleiros com entorno conservado, com 10.306 sementes e 69 espécies diferentes, enquanto a diversidade de espécies em regeneração foi superior sob a copa dos poleiros naturais de carnaúba. Os poleiros desempenharam um papel importante na facilitação da chuva de sementes zoocóricas e no recrutamento das espécies (GONÇALVES, 2017).

No segundo experimento, o plantio de mudas foi realizado em três tipos de solo (Planossolo Háplico Eutrófico, Vertissolo Hidromórfico Sódico e Neossolo Flúvico) com seis espécies nativas. A sobrevivência das mudas foi significativamente maior no Planossolo (87,5%) e no Neossolo (84,7%), com o sabiá apresentando 100% de sobrevivência nos dois solos. A utilização de hidrogel mostrou-se benéfica para a sobrevivência das mudas em solos mais desfavoráveis (GONÇALVES, 2017).

No terceiro experimento, foi avaliado o efeito da bagana de carnaúba na sobrevivência e desenvolvimento de mudas de três espécies (coronha, sabiá e marizeiro) em Vertissolo Hidromórfico. Os resultados indicaram que a aplicação da bagana sobre as covas aumentou a sobrevivência e o crescimento das mudas, enquanto a aplicação dentro das covas teve um efeito

prejudicial (GONÇALVES, 2017).

As conclusões do estudo destacam que a técnica de nucleação com poleiros artificiais é promissora para a recuperação de áreas degradadas na Caatinga, facilitando a dispersão de sementes e a regeneração natural. Além disso, o plantio de mudas em diferentes tipos de solo mostrou que a escolha do tipo de solo e a aplicação de condicionadores como o hidrogel podem influenciar significativamente o sucesso da recuperação. A utilização de bagana de carnaúba como cobertura morta demonstrou ser eficaz em melhorar a sobrevivência e o crescimento das mudas em solos salinos. Essas técnicas podem ser adaptadas para melhorar a eficácia dos esforços de restauração na Caatinga (GONÇALVES, 2017).

Silva (2010) realizou um estudo focado na dispersão de sementes, banco de sementes e regeneração natural de três espécies arbóreas da Caatinga: cumaru, aroeira e ipê-roxo. A pesquisa destaca a importância da regeneração natural para a manutenção dos ecossistemas florestais, sendo essa representada pelo banco de plântulas, que inclui vegetação em desenvolvimento no sub-bosque da floresta. A regeneração natural depende do contato das sementes com o solo, germinação e condições ambientais favoráveis, como calor, luminosidade e umidade. A dispersão de sementes é um processo essencial, pois a semente deve chegar a um local propício para germinar, evitando competição e predação próxima à planta-mãe (SILVA, 2010).

O estudo revelou que as sementes de cumaru e aroeira são dispersas principalmente nos sentidos norte e oeste, enquanto as de ipê-roxo nos sentidos norte e sul. As sementes das três espécies mostraram alta germinabilidade em viveiro, mas perdem viabilidade rapidamente em condições de campo, indicando um banco de sementes transitório. No campo, a germinação ocorre logo após as primeiras chuvas, sendo distribuída ao longo do período chuvoso. A predominância de indivíduos nas menores classes de diâmetro e altura indica alta taxa de regeneração. Cumaru contribuiu com maior número de indivíduos no estrato arbóreo, sendo a melhor adaptada ao estágio de sucessão da área (SILVA, 2010).

As conclusões sugerem que a falta de condições ambientais adequadas pode levar à extinção das espécies na área, ressaltando a importância do manejo florestal para favorecer o crescimento e maximizar o volume das espécies desejáveis (SILVA, 2010).

A vasta gama de estudos revisados demonstra a complexidade e a diversidade de técnicas aplicáveis ao reflorestamento de áreas degradadas, com destaque para ecossistemas de terras secas, como a Caatinga. Cada abordagem apresenta vantagens e desafios, refletindo a necessidade de estratégias adaptativas e integradas para promover a recuperação ambiental. A revisão incluiu métodos de plantio de árvores, semeadura direta, técnicas de viveiro, uso de

tecnologias inovadoras como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) e Tecnologias de Aprimoramento de Sementes (SETs), bem como a importância da participação comunitária e de políticas públicas robustas. A aplicação desses conhecimentos ao contexto específico da Caatinga revela a necessidade de desenvolver soluções localmente adaptadas para melhorar a sobrevivência das mudas e a cobertura vegetal do solo, aspectos relevantes para a restauração ecológica eficiente.

2.3 Técnica de nucleação para recuperação de áreas degradadas

A técnica de nucleação se destaca como uma abordagem promissora para a recuperação de áreas degradadas, demonstrando grande viabilidade para futuras aplicações. Esta metodologia consiste em criar pequenos núcleos de vegetação que aceleram a regeneração natural do ecossistema ao seu redor, promovendo a diversidade biológica e a resiliência do ambiente. Além de ser ecologicamente eficaz, a nucleação apresenta um custo relativamente baixo em comparação com métodos tradicionais de reflorestamento, tornando-se uma alternativa economicamente viável e sustentável para a recuperação de terras degradadas. De forma a embasar esse destaque, objetivando sua utilização neste trabalho, traz-se algumas publicações disponíveis na literatura.

Lemos e Ferreira (2014) avaliaram a viabilidade da utilização de técnicas de nucleação para a recuperação de áreas degradadas pela extração de argila vermelha em Corumbataí, SP. A metodologia envolveu a caracterização do ecossistema degradado e a seleção das técnicas de nucleação mais adequadas, como a transposição de solo, galharia, chuvas de sementes e poleiros artificiais e naturais. A área estudada apresentou baixo grau de degradação, com formas de relevo suaves e ausência de processos erosivos significativos. A vegetação predominante era *Brachiaria*, cuja presença minimiza a erosão, mas impede o desenvolvimento de espécies nativas. A regeneração natural foi observada, mas ocorre de forma lenta. O estudo concluiu que a introdução de núcleos de nucleação em até 5% da área degradada pode acelerar o processo de restauração ecológica, melhorando a recuperação do solo e dos recursos hídricos, beneficiando a biodiversidade local e outros empreendedores da região (LEMOS e FERREIRA, 2014).

Souza e Costa (2010) analisaram a eficácia do método de nucleação na recuperação de matas ciliares, com foco na microbacia do Córrego Água Quente em Ibitinga, SP. A metodologia envolveu a aplicação de três técnicas de nucleação: transposição de solo, transposição de galharia e grupos de Anderson. A avaliação do processo sucessional foi feita através da análise da cobertura vegetal e da diversidade de espécies vegetais emergentes. Os resultados mostraram que a técnica de transposição de galharia foi a mais eficaz em termos de

diversidade vegetal, atraindo uma variedade maior de espécies, incluindo aquelas dispersas por aves. A transposição de solo também apresentou um aumento significativo na cobertura vegetal, enquanto os grupos de Anderson tiveram resultados limitados devido ao período inadequado de plantio. A pesquisa conclui que a nucleação é uma estratégia promissora para a restauração de matas ciliares, promovendo a recuperação natural do ecossistema de forma mais eficiente e sustentável (SOUZA e COSTA, 2010).

Silva (2011) avaliou a eficácia das técnicas de nucleação na restauração ecológica das matas ciliares do Córrego Santo Antônio, localizado na Fazenda Santo Antônio, em Jaú, SP. A metodologia envolveu a implementação de quatro técnicas de nucleação: transposição de solo, poleiros artificiais, núcleos de Anderson e transposição de galharia, sendo o monitoramento realizado de fevereiro a maio de 2011. As avaliações foram baseadas nos indicadores para monitoramento de nucleação, do projeto Mata Ciliar da Secretaria Estadual de Meio Ambiente. Os resultados mostraram a presença de 421 regenerantes naturais de 17 famílias e 29 espécies diferentes, destacando-se *Solanum mauritianum* e *Gnaphalium spathulatum*. Apesar das interferências negativas, como a introdução de espécies exóticas e aplicação de herbicidas, as funções ecológicas da área estão sendo gradualmente restituídas. As técnicas de transposição de galharia e poleiros artificiais foram eficazes na atração de fauna e dispersão de sementes, enquanto os núcleos de Anderson mostraram-se os mais eficientes na regeneração de espécies vegetais. A pesquisa conclui que a nucleação é uma estratégia promissora para a restauração de áreas degradadas, porém, requer avaliações a longo prazo para validar sua eficiência (SILVA, 2011).

Daltro et al. (2013) avaliaram a eficácia das técnicas de nucleação na recuperação ambiental de áreas degradadas situadas no Alto Rio São Lourenço, em Campo Verde-MT. A pesquisa foi realizada conforme o Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD) e seguiu os princípios da nucleação. A área experimental foi dividida em cinco tratamentos com diferentes técnicas, incluindo plantio de muvuca de sementes e adubação verde. Foram selecionadas três parcelas aleatórias de 81 m² para cada tratamento, totalizando 12 parcelas. As atividades de campo ocorreram em três coletas realizadas entre 2011 e 2012. Os indicadores monitorados incluíram flores, frutos, sementes, vestígios de fauna, produção de serapilheira, cobertura vegetal do solo e microclimas. Os resultados mostraram aumento da umidade relativa do ar e diminuição da temperatura, indicando a formação de microclimas favoráveis à regeneração. Observou-se também a presença de uma diversidade significativa de espécies vegetais e animais, confirmando a viabilidade das técnicas de nucleação para a restauração ecológica. O estudo conclui que a nucleação é uma estratégia eficiente para recuperar áreas

degradadas, promovendo o retorno da biodiversidade e melhorando as condições ambientais locais (DALTRO et al., 2013).

Oliveira e Rezende (2021) investigaram a eficiência das técnicas de nucleação na recuperação de áreas de Vereda degradadas em Felixlândia, MG, usando transposição de solo e poleiros artificiais, comparando-os com áreas testemunhas. A pesquisa foi realizada ao longo de seis meses, entre abril e outubro de 2019, com nove visitas in loco. Foram definidos três tratamentos para cada técnica e três áreas testemunhas, totalizando uma área de estudo de 50m x 20m. Os resultados indicaram que os poleiros artificiais, especialmente o terceiro, atraíram maior quantidade de aves, evidenciada pelas fezes nos galhos e no solo. A transposição de solo mostrou melhores resultados na primeira área, com maior quantidade de plantas germinando. As áreas testemunhas, particularmente a terceira, exibiram regeneração espontânea devido à exposição do banco de sementes. Embora nenhuma técnica tenha se destacado significativamente em comparação com as outras, todas demonstraram potencial para a recuperação ambiental. A pesquisa conclui que as técnicas de nucleação são eficazes, mas precisam ser implementadas no início do período chuvoso e monitoradas por pelo menos um ano para resultados mais robustos (OLIVEIRA e REZENDE, 2021).

Duarte (2021) descreveu a experiência de recuperação de uma área degradada na Fazenda Domingos Pontes, Caucaia-CE, utilizando técnicas de nucleação. A área, que apresentava degradação significativa devido a atividades antrópicas e invasão de espécies como *Cryptostegia madagascariensis*, foi subdividida em três unidades com diferentes graus de degradação. Foram implementadas várias técnicas de nucleação, incluindo núcleos de Anderson, transposição de solo, núcleos de sementes, núcleos de serrapilheira, galharias e poleiros artificiais. A metodologia envolveu a preparação do solo e a plantação de mudas nativas, além de monitoramento contínuo aos 30 e 90 dias após a implementação. Os resultados mostraram aumento no desenvolvimento de algumas mudas, especialmente nos núcleos de Anderson e de sementes, embora os demais núcleos não apresentassem resultados conclusivos. A pesquisa conclui que a nucleação é uma técnica promissora para a recuperação de áreas degradadas, destacando a importância de um monitoramento contínuo e a adaptação das técnicas às condições locais para alcançar resultados mais robustos (DUARTE, 2021).

Pimenta Junior (2017) investigou o uso de técnicas de nucleação na restauração de áreas degradadas em áreas verdes urbanas e no fornecimento de serviços ambientais. A pesquisa aborda a necessidade de conservar e utilizar técnicas inovadoras para recuperar essas áreas, uma vez que a expansão urbana contribui significativamente para a degradação, fragmentação de ecossistemas e perda de biodiversidade. A metodologia envolveu a aplicação de técnicas de

nucleação, como transposição de solo e serapilheira, em áreas degradadas da Trilha Ecológica do Parque Ecológico Universitário do Campus de Pituacu. A pesquisa foi estruturada em três capítulos, abordando serviços ambientais, métodos iniciais de restauração e uma proposta de protocolo de avaliação dos serviços ambientais na recuperação de áreas urbanas. Os resultados mostraram que a nucleação tem um potencial expressivo no fornecimento de serviços ambientais, apesar de práticas simples como a transposição de solo e serapilheira serem eficazes. No entanto, é crucial que os planos de recuperação estejam alinhados com a vocação e necessidade da área degradada, especialmente em contextos urbanos (PIMENTA JUNIOR, 2017).

Leal Filho et al. (2013) compararam diferentes técnicas de nucleação na restauração de áreas degradadas pela exploração de petróleo na Amazônia Brasileira. O objetivo foi desenvolver técnicas de baixo custo utilizando elementos naturais locais, permitindo a regeneração natural de espécies arbóreas pioneiras. Foram testados cinco tratamentos: controle (T0), aplicação de *topsoil* em canteiros escarificados manualmente e adubados, com proteção lateral (T1), sem proteção lateral (T2), diretamente sobre a superfície adubada (T3), e por hidrossemeadura (T4). A avaliação dos efeitos incluiu a densidade aparente do solo, fertilidade e densidade de plântulas emergidas. Após 18 meses, os tratamentos T1, T2 e T3 mostraram maior densidade de indivíduos estabelecidos, enquanto T0 e T4 não apresentaram emergência de plântulas. O tratamento T1 teve a maior densidade média de indivíduos ao longo dos períodos analisados, com o maior número de espécies estabelecidas. O estudo conclui que a nucleação, especialmente com proteção lateral, é eficaz na restauração inicial de vegetação secundária em áreas degradadas, destacando a importância do uso do *topsoil* e da proteção contra erosão (LEAL FILHO et al., 2013).

Trentin et al. (2018) avaliaram três diferentes técnicas de restauração florestal na Mata Atlântica: restauração passiva, nucleação e plantio de alta diversidade, em uma área de 7,2 hectares em Dois Vizinhos, Paraná. A metodologia envolveu 12 parcelas com três tratamentos distribuídos em quatro blocos casualizados. T1 consistiu na regeneração natural (restauração passiva), T2 utilizou um conjunto de técnicas de nucleação, e T3 empregou o plantio de mudas em linhas de recobrimento e diversidade. Após dois anos e oito meses, foram identificadas e quantificadas todas as plantas com mais de 50 cm de altura em três subparcelas aleatórias por parcela.

Os resultados mostraram que a técnica de plantio apresentou a maior diversidade de Shannon (3,017) com 148 indivíduos e 53 espécies, embora não tenha havido diferença significativa. A nucleação obteve um índice de Shannon de 2,078, com 908 indivíduos e 40

espécies, enquanto a restauração passiva apresentou um índice de 1,965 com 2.018 indivíduos e 40 espécies. A nucleação facilitou a regeneração natural de espécies, enquanto a restauração passiva evidenciou alta resiliência e apresentou resultados similares à nucleação em termos de diversidade, mas com menor custo. Portanto, a restauração passiva pode ser considerada uma alternativa eficiente devido ao seu custo reduzido (TRENTIN et al., 2018).

Sousa et al. (2013) investigaram a eficiência de diferentes técnicas de nucleação na recuperação de áreas degradadas, focando em métodos de baixo custo e alto impacto ecológico. A nucleação baseia-se no princípio de que certas espécies facilitam a colonização por outras ao melhorar as condições ambientais locais.

As técnicas avaliadas incluem a transposição de solo, poleiros artificiais, transposição de galharia e plantio de mudas em ilhas de alta diversidade. A transposição de solo visa resgatar a fauna e flora do solo de áreas conservadas para áreas degradadas, facilitando a formação de núcleos vegetativos. Os poleiros artificiais atraem aves e morcegos que dispersam sementes, promovendo a regeneração natural. A transposição de galharia cria micro-habitats favoráveis ao desenvolvimento de plântulas e atração de fauna. O plantio de mudas em ilhas de alta diversidade aumenta a chance de sucesso na restauração, formando núcleos vegetativos que se expandem com o tempo (SOUSA et al., 2013).

O estudo conclui que as técnicas de nucleação são eficazes na restauração de áreas degradadas, contribuindo para a formação de corredores ecológicos, aumento da biodiversidade e melhoria das condições edáficas. A pesquisa destaca a importância da implementação dessas técnicas no início do período chuvoso e seu monitoramento contínuo para garantir o sucesso na recuperação ambiental (SOUSA et al., 2013).

Bitencourt et al. (2007) estudaram a capacidade de *Mimosa bimucronata* (maricá) de promover a nucleação em áreas degradadas pela mineração de carvão em Criciúma, SC. O objetivo foi verificar a influência do tamanho e da distância dos núcleos vegetativos em relação à fonte de propágulos no número de espécies que os colonizam. A pesquisa foi realizada em uma área de baixada inundável da planície aluvial do rio Sangão, que foi aterrada com rejeitos de carvão e recoberta por uma camada de material areno-argiloso.

A metodologia envolveu a identificação de 12 núcleos formados sob a copa de indivíduos de *M. bimucronata*, considerados unidades amostrais. Foram medidos a altura, diâmetro e área basal total dos indivíduos lenhosos presentes em cada unidade, além da distância até a fonte de propágulos e a área ocupada pelas unidades amostrais. A análise de correlação de Pearson foi utilizada para avaliar a relação entre a distância da fonte e o número de espécies e indivíduos (BITENCOURT et al., 2007).

Os resultados mostraram que a área das ilhas variou de 1,04 a 41,72 m², com altura dos indivíduos de *M. bimucronata* entre 0,80 e 2,0 m. O número de espécies por unidade amostral variou de zero a 10, enquanto o número de indivíduos variou de zero a 135. As correlações entre a distância da fonte e o número de espécies ($r = -0,256$) e entre a distância da fonte e o número de indivíduos ($r = -0,051$) foram negativas, mas não significativas. Em contraste, as correlações entre a área ocupada pelas unidades amostrais e o número de espécies ($r = 0,845$) e o número de indivíduos ($r = 0,766$) foram positivas e altamente significativas (BITENCOURT et al., 2007).

A hipótese da Teoria da Biogeografia de Ilhas foi confirmada, mostrando que o número de espécies diminui com o aumento da distância da fonte de propágulos e aumenta com o tamanho da mancha. *M. bimucronata* demonstrou ser uma espécie nucleadora eficaz, fornecendo abrigo à fauna, funcionando como poleiro para a avifauna e protegendo plântulas de espécies nativas (BITENCOURT et al., 2007).

Martins et al. (2021) avaliaram a recuperação de áreas degradadas no Parque Natural Municipal de Nova Iguaçu, RJ, utilizando técnicas de nucleação. A pesquisa foi conduzida para mitigar os impactos negativos da degradação ambiental resultante de atividades antrópicas na área de amortecimento do parque. A metodologia envolveu a aplicação de técnicas como transposição de solo, transposição de galharia, poleiros artificiais e plantio de mudas nativas em núcleos, acompanhadas por monitoramento da regeneração natural. As áreas foram monitoradas ao longo de um período de 24 meses para avaliar a cobertura vegetal, diversidade de espécies e a recuperação do solo.

Os resultados indicaram um aumento significativo na cobertura vegetal e na diversidade de espécies nas áreas onde as técnicas de nucleação foram aplicadas. A transposição de solo mostrou-se eficaz na recuperação da fertilidade do solo e na promoção da regeneração de espécies nativas. Os poleiros artificiais atraíram aves, facilitando a dispersão de sementes e a regeneração natural. A transposição de galharia forneceu micro-habitats favoráveis ao estabelecimento de plântulas. Conclui-se que a nucleação é uma estratégia viável e eficaz para a recuperação de áreas degradadas, promovendo a restauração ecológica e a melhoria da biodiversidade local (MARTINS et al., 2021).

2.4 Custos inerentes às atividades de reflorestamento

A avaliação de custos em projetos de reflorestamento é essencial para garantir a viabilidade econômica e a eficiência das operações. Este processo permite identificar e otimizar os recursos necessários, assegurando que as metas ambientais sejam alcançadas de forma

sustentável. Partindo dessa premissa, a introdução de metodologias inovadoras e de baixo custo pode transformar a abordagem tradicional, reduzindo significativamente os investimentos e tornando o reflorestamento mais acessível. Para tanto é necessário colacionar trabalhos previamente estabelecidos de modo a demonstrar que uma nova metodologia, como a aqui se propõe, é economicamente vantajosa. Nesse contexto, passa-se a avaliar alguns estudos disponíveis na literatura científica.

O estudo de Summers et al. (2015) apresentou um modelo espacial para estimar os custos de estabelecimento de plantações de árvores para sequestro de carbono e biodiversidade na Austrália. A pesquisa visa abordar a variabilidade espacial nos custos de reflorestamento, utilizando três métodos de revegetação: plantio manual de mudas, plantio mecânico de mudas e semeadura direta. A decisão entre os métodos foi baseada em parâmetros de solo e terreno.

A metodologia envolveu a aplicação de um modelo parametrizado com dados de custos espaciais obtidos a partir da literatura e entrevistas com profissionais da indústria. Foram analisadas áreas agrícolas intensivas, com 3206 km² destinados ao plantio manual de mudas e 903.127 km² ao plantio mecânico, com custos variando de US\$ 1763/ha a US\$ 6396/ha para plantações que visam estocar carbono. Para plantações com cunho de restauração ambiental, 326.512 km² foram destinados à semeadura direta, 3206 km² ao plantio manual de mudas e 576.615 km² ao plantio mecânico, com custos variando de US\$ 1703/ha a US\$ 9097/ha (SUMMERS et al., 2015).

Os resultados destacam a importância das plantações destinadas ao estoque de carbono para a mitigação das mudanças climáticas e a relevância da precisão nos custos de estabelecimento para decisões econômicas viáveis. O estudo conclui que a semeadura direta é a forma mais barata de reflorestamento, enquanto o plantio manual de mudas é o mais caro, influenciado por fatores como densidade de plantio, custo de mudas e uso de proteções para plantas (SUMMERS et al., 2015).

Fargione et al. (2021) investigaram os desafios para a implementação de um programa de reflorestamento em grande escala nos Estados Unidos, visando mitigar as mudanças climáticas e fornecer serviços ecossistêmicos. A pesquisa utilizou análises GIS, pesquisas com gestores de viveiros e silvicultores, e uma síntese da literatura para avaliar as oportunidades e desafios associados ao cumprimento das metas de reflorestamento. O cenário analisado propõe o reflorestamento de 26 milhões de hectares até 2040, com um custo estimado de US\$ 33 bilhões, variando entre US\$ 24 bilhões e US\$ 53 bilhões, dependendo das condições regionais e do tipo de terreno.

A metodologia envolveu a avaliação da capacidade atual de produção de mudas, que

precisaria aumentar em 1,7 bilhões de mudas anualmente, um aumento de 2,3 vezes em relação aos níveis atuais. A pesquisa destacou que, além do investimento direto no reflorestamento, seria necessário expandir a capacidade de coleta de sementes, produção de mudas, desenvolvimento da força de trabalho e melhorias nas práticas pré e pós-plantio. Os resultados indicaram que os custos de reflorestamento variam amplamente entre as regiões: US\$ 788 por hectare no sul, US\$ 1.058 no oeste, e US\$ 2.098 no leste dos Estados Unidos. Esses custos incluem preparação do solo, plantio, e tratamentos pós-plantio, sendo influenciados por fatores como tipo de solo, topografia e densidade de plantio (FARGIONE et al., 2021).

Os autores concluem que, para alcançar as metas propostas, é fundamental obter apoio público para investir nas atividades necessárias e criar incentivos para os proprietários de terras. A pesquisa ressalta que um aumento na capacidade de produção de mudas e a implementação de práticas adequadas são cruciais para o sucesso do reflorestamento em larga escala (FARGIONE et al., 2021).

Brancalion et al. (2021) exploraram a relação custo-efetividade das abordagens de restauração florestal na Mata Atlântica do Brasil, focando na acumulação de carbono acima e abaixo do solo em paisagens agrícolas. A pesquisa compara florestas de crescimento secundário e plantações de árvores de espécies mistas ao longo de cronossequências de 10 a 60 anos, além de remanescentes florestais de referência. A metodologia incluiu a avaliação dos custos de implementação e oportunidades de uso da terra, bem como a recuperação dos estoques de carbono no solo e acima do solo.

Os resultados mostraram que as plantações acumulam aproximadamente 50% mais carbono acima do solo do que as florestas de crescimento secundário ao longo da cronossequência. No entanto, os custos totais de efetividade para acumulação de carbono, que incluem custos de implementação e de oportunidade de uso da terra, foram em média 60% maiores para florestas de crescimento secundário (15,1 kgC.US\$⁻¹) em comparação com as plantações (9,4 kgC.US\$⁻¹). Embora as plantações de árvores apresentem inicialmente maiores taxas de armazenamento de carbono, seus custos de implementação e oportunidade mais elevados as tornam menos custo-efetivas para o sequestro de carbono. Além disso, os mercados de carbono, nos níveis de preços atuais, têm potencial limitado para escalar os esforços de restauração na Mata Atlântica do Brasil (BRANCALION et al., 2021).

O estudo conclui que, embora as plantações de árvores possam acumular mais carbono acima do solo, a regeneração natural das florestas é mais custo-efetiva devido aos menores custos de implementação e oportunidade, destacando a importância de investimentos em abordagens de restauração que equilibrem custos e benefícios ambientais (BRANCALION et

al., 2021).

Silva (2021) abordou a estimativa de custos para o reflorestamento de áreas de pastagens degradadas no município de Jaru, Rondônia, destacando a implementação de um Programa de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) de tipo silvipastoril. Rondônia é um dos estados brasileiros com maior índice de desmatamento, causado principalmente por programas de colonização e conversão de uso da terra para agroindústria e pecuária extensiva.

A metodologia do PRAD foi baseada no modelo preconizado pelo IBAMA, atualizado em 2018, e a duração estimada do projeto é de três anos. O estudo incluiu a avaliação dos custos de recuperação de um hectare de pastagem degradada, considerando implantação e manutenção. O custo total estimado foi de R\$ 28.591,90, sendo R\$ 19.434,00 (68% do total) para a implantação no primeiro ano, e R\$ 9.157,90 (32%) para a manutenção nos dois anos subsequentes (SILVA, 2021).

Os resultados indicam que o sistema agroflorestal silvipastoril, associado à pecuária de corte ou leiteira, é uma atividade econômica mais rentável em comparação com a pecuária convencional. O reflorestamento deve ser preferencialmente realizado com espécies nativas do bioma local, mas também pode incluir espécies exóticas como o eucalipto. Além dos benefícios econômicos, os sistemas silvipastoris são multifuncionais, promovendo a intensificação da produção através do manejo integrado dos recursos naturais, prevenindo a degradação e recuperando a capacidade produtiva do solo. Estes sistemas também ajudam a reduzir a erosão, melhorar a conservação da água, reduzir a necessidade de fertilizantes minerais, capturar e fixar carbono, diversificar a produção e aumentar a biodiversidade e o conforto dos animais (SILVA, 2021).

O estudo de Bacha (2006) analisou a evolução do reflorestamento no Brasil, avaliando os programas federais anteriores destinados a estimular essa atividade, com foco no Programa de Incentivos Fiscais para Reflorestamento (PIFFR). A pesquisa destaca o aumento significativo da área reflorestada no Brasil desde a década de 1970, apesar da escassez iminente de madeira em tora das áreas reflorestadas nas primeiras décadas do século XXI. O período de 1960 a 1980 foi marcado por programas de incentivo do governo federal, enquanto a década de 1990 não teve programas de estímulo, resultando em uma estagnação na produção e aumento da demanda (BACHA, 2006).

A metodologia utilizou uma abordagem tradicional de custo-benefício para avaliar o PIFFR, comparando seus custos e benefícios sociais. A análise mostrou que, apesar do impacto positivo na expansão das áreas reflorestadas, o custo social dos incentivos fiscais era muito alto em relação aos benefícios sociais obtidos. O estudo revela que o PIFFR teve um custo social de

US\$ 376,20 por cada US\$ 1,00 em benefício social. A análise também indicou que a redistribuição dos recursos do PIFFR beneficiou desproporcionalmente grandes empresas, muitas vezes subsidiárias de setores não agrícolas, aumentando a concentração de riqueza (BACHA, 2006).

Os resultados sugerem que novos programas de reflorestamento devem focar em pequenas e médias propriedades rurais, utilizando doações de mudas, insumos agrícolas e assistência técnica como mecanismos de incentivo. Esses programas têm mostrado ser mais eficazes e eficientes do que os incentivos fiscais, proporcionando maiores retornos sociais e evitando a concentração de riqueza. O estudo conclui que políticas que promovem o reflorestamento em pequenas e médias propriedades podem ajudar a mitigar a escassez de madeira no Brasil, melhorando a competitividade e fomentando novas indústrias (BACHA, 2006).

O estudo de Brancalion et al. (2019) investigou os componentes e fatores que tornam elevado o custo da restauração de ecossistemas no Brasil. A pesquisa analisou projetos de restauração na Amazônia, Cerrado e Mata Atlântica, focando nos custos associados a diferentes métodos de restauração. A ideia principal foi entender por que a restauração é tão onerosa e identificar estratégias para reduzir os custos.

A metodologia envolveu a coleta de dados detalhados sobre os custos de implementação e manutenção de projetos de restauração, divididos em três categorias principais: plantio de mudas, semeadura direta e regeneração natural. Os dados foram obtidos de 64 projetos em 17 estados brasileiros, abrangendo uma área total de 75.778 hectares (BRANCALION et al., 2019).

Os resultados mostram que os métodos de plantio de mudas e semeadura direta são os mais caros, representando 60-90% dos projetos analisados, com custos médios de US\$ 2000 por hectare. Em contraste, a regeneração natural, que é significativamente mais barata, foi utilizada em menos de 15% dos projetos. A regeneração natural tem um custo médio de US\$ 1000 por hectare, mas sua aplicação é limitada pela necessidade de condições ambientais específicas (BRANCALION et al., 2019).

Os custos totais estimados para restaurar 12 milhões de hectares até 2030 variam entre US\$ 8,9 bilhões e US\$ 15,6 bilhões, dependendo da proporção de áreas restauradas por métodos ativos (plantio de mudas e semeadura direta) e passivos (regeneração natural). A pesquisa conclui que para tornar a restauração mais acessível, é necessário aumentar o uso de métodos de regeneração natural e melhorar a eficiência dos métodos de plantio ativos, além de políticas públicas que incentivem práticas de baixo custo (BRANCALION et al., 2019).

Plaster et al. (2008) investigaram os custos de reflorestamento em uma Área de Preservação Permanente (APP) na Fazenda Maringá, Alta Floresta, MT. A ideia principal é avaliar economicamente a recuperação de áreas degradadas. A metodologia envolveu entrevistas com o empreendedor e consulta de preços locais para levantar os custos de implantação e manutenção. A área de estudo foi de 5 hectares. Foram analisados os custos de cercamento, plantio de mudas e manutenção. O custo total foi de R\$ 10.885,65, com R\$ 2.177,13 por hectare. O cercamento representou a maior parte dos custos (56%), seguido pela aquisição de mudas (16%), manutenção (14%) e mão-de-obra (14%). A pesquisa conclui que a determinação de custos auxilia no planejamento de atividades ambientais locais, sendo essencial para a recuperação eficaz de áreas degradadas (PLASTER et al., 2008).

Aquino et al. (2022) avaliaram os custos de recomposição em uma Área de Preservação Permanente (APP) no Distrito Federal. A pesquisa foi conduzida na sub-bacia do Córrego Capão da Onça, em Brazlândia, DF, em uma área de 0,73 ha dividida em três trechos com diferentes estratégias de restauração. No Trecho 1 (0,28 ha), com 80% de cobertura de espécies invasoras, foram plantadas 150 mudas de espécies nativas e amendoim-forrageiro. No Trecho 2 (0,21 ha), com 70% de cobertura de invasoras, foram plantadas 130 mudas de espécies nativas. No Trecho 3 (0,24 ha), também com 70% de cobertura de invasoras, foi realizada apenas a roçagem ao redor dos indivíduos regenerantes.

A metodologia incluiu controle mecânico de plantas invasoras e o plantio de mudas nativas. A análise dos custos apontou que as ações iniciais de recomposição da vegetação nativa totalizaram R\$ 11.147,60 para a área de 0,73 ha, o que representa R\$ 15.270,70 por hectare. A maior parte dos custos foi destinada à aquisição de mudas (47,77%) e mão-de-obra (34,09%). O custo para instalar 200 metros de cerca foi de R\$ 8.691,70, aumentando significativamente os custos totais da recomposição (AQUINO et al., 2022).

Os resultados destacam a importância de avaliar o custo/benefício ecológico e a necessidade de monitoramento a médio e longo prazo para determinar as melhores práticas para restaurar áreas dominadas por plantas invasoras. O estudo conclui que o custo da implantação está diretamente relacionado às estratégias de recomposição adotadas, sendo as maiores despesas associadas à aquisição de mudas e à mão-de-obra (AQUINO et al., 2022).

Concluindo o referencial teórico sobre reflorestamento em terras secas e na Caatinga, é seguro afirmar que a técnica de nucleação emerge como uma estratégia de interesse, dada sua eficiência e sustentabilidade demonstrada em outros casos de recuperação de áreas degradadas. Sobre este método pode-se destacar alguns predicados como: aceleração da regeneração natural, promoção da biodiversidade e resiliência dos ambientes. Isto posto, a técnica de nucleação

atrelada a uma técnica de plantio capaz de reduzir os custos envolvidos nas atividades de reflorestamento, demonstra potencial para ser uma solução viável tanto do ponto de vista ecológico quanto econômico, oferecendo uma alternativa para a recuperação de áreas degradadas na Caatinga.

Posto isso, passa-se a descrever os métodos e técnicas desenvolvidos com intuito de investigar a situação acima oportunizada.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Dados os objetivos desse trabalho, os procedimentos metodológicos se delineiam de forma a contemplar o que fora estabelecido. Apesar do sistema aqui apresentado funcionar de maneira concatenada, pela própria acepção da palavra, onde cada etapa influencia e é influenciada pelas demais, conforme se vê no resumo gráfico na Figura 3, optou-se por dividir o trabalho em duas linhas de abordagens. A primeira é destinada ao desenvolvimento dos equipamentos, métodos e técnicas relativos à dispersão aérea das sementes. A segunda diz respeito aos procedimentos e ensaios investigativos sobre a peletização e germinação das sementes.

A escolha dessas técnicas visa minimizar os custos envolvidos nas atividades de reflorestamento, além de maximizar a eficiência e a eficácia do reflorestamento em áreas de difícil acesso e sujeitas a condições ambientais adversas. Os foguetes movidos a água serão utilizados para dispersar sementes encapsuladas em áreas selecionadas, aproveitando a tecnologia de lançamento para cobrir grandes extensões de terreno de forma econômica e sustentável. O encapsulamento de sementes, por sua vez, tem como objetivo proteger as sementes durante o lançamento e aumentar suas chances de germinação e crescimento, mesmo em condições de solo e clima desafiadoras. Essa metodologia será detalhada nessa seção, incluindo a descrição dos materiais utilizados, os procedimentos de construção e operação dos foguetes, e as técnicas de encapsulamento e monitoramento das sementes.

Figura 3: Resumo gráfico da pesquisa



Fonte: Autor (2024).

3.1 Desenvolvimento de foguetes dispersores

Para o cumprimento do objetivo proposto, foguetes mais complexos do que os lúdicos e simplificados foguetes de garrafa pet, geralmente utilizados em atividades educacionais, precisaram ser desenvolvidos. Em levantamento bibliográfico não se observou qualquer estudo adensado sobre o tema, no máximo alguns projetos escolares em nível conceitual.

Nesse contexto, viu-se a necessidade de proceder com a pesquisa por grupos amadores de modelismo de foguete movidos a água com técnicas de construção mais sofisticadas. A pesquisa acabou por encontrar apenas dois grupos que se dedicam a produzir e divulgar seus resultados com esse tipo de foguete. O mais completo é um grupo sediado em Sydney, Austrália, denominado *Air Command Water Rockets* (<http://www.aircommandrockets.com/>), o segundo é um grupo alemão, denominado *Raketfued Rockets* (<http://www.raketfuedrockets.com/en/index.htm>).

Os foguetes são, por natureza, veículos que tem como princípio de movimento a 3ª Lei de Newton, ou, de maneira análoga, pela conservação do momento linear. A 3ª Lei de Newton enuncia que: a toda ação corresponde uma reação de mesma intensidade, mesma direção e sentido oposto. Já a conservação do momento afirma que em um sistema a soma das massas dos corpos multiplicadas pelas suas respectivas velocidades são conservadas, tendo sua definição matemática dada pela equação 1.

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i \quad (1)$$

Independentemente de qual seja a origem da propulsão, tais veículos para se deslocarem aceleradamente precisam ejetar matéria na direção contrária. Tradicionalmente os foguetes são construídos de tal modo que em seu interior haja a queima de um combustível à taxas elevadas, onde os gases produzidos nessa reação são expelidos com velocidades supersônicas por uma tubeira.

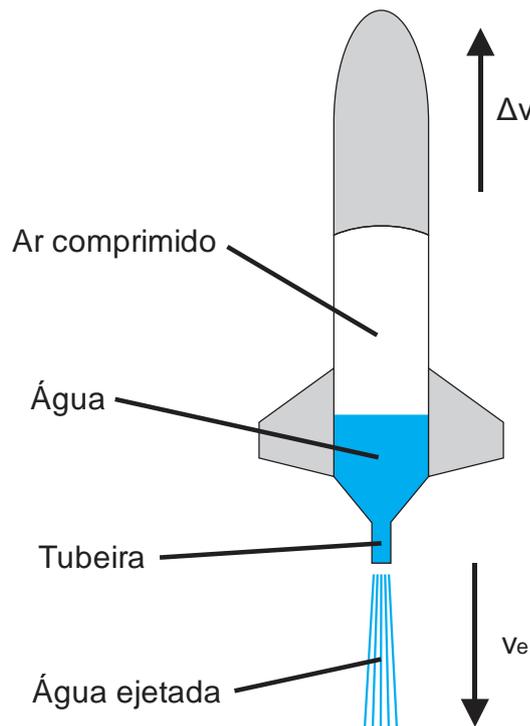
Para que haja máxima eficiência, os foguetes são projetados com uma forma que minimize o coeficiente de arraste aerodinâmico, tenham uma carcaça relativamente leve, quando comparada à massa a ser expelida, e, principalmente, que o material expelido venha a ter a máxima velocidade possível. No caso dos foguetes propelidos a água pressurizada, esses princípios são seguidos, porém, no lugar dos gases produzidos a partir da queima, a água pressurizada é que sai pela tubeira com grande velocidade, conferindo ao foguete um deslocamento acelerado na direção oposta. Podemos visualizar de forma ilustrativa esse conceito no diagrama mostrado na Figura 4.

De maneira a exemplificar esse princípio, toma-se a equação 2 de Tsiolkovsky – pioneiro no estudo de foguetes, para um ambiente livre de forças externas e com um foguete hipotético cuja velocidade de ejeção de matéria se dê a uma velocidade v_e constante:

$$\Delta v = v_e \ln \frac{m_i}{m_f} \quad (2)$$

É de fácil percepção, que o incremento de velocidade, nessa equação, acontece à medida que a massa é ejetada a uma velocidade constante. Analisando a expressão, reforça-se o que fora dito anteriormente, a eficiência é aperfeiçoada, assim entendida como a majoração do incremento Δv , fazendo a velocidade de ejeção v_e ser a maior possível. Manter a massa do foguete vazio (massa final – m_f), pequena, em relação à massa do foguete carregado (massa inicial – m_i), apesar de auxiliar a maximizar a eficiência, não tem uma resposta tão significativa quando aumentar a velocidade de ejeção.

Figura 4: Diagrama de elementos de propulsão de foguetes à água

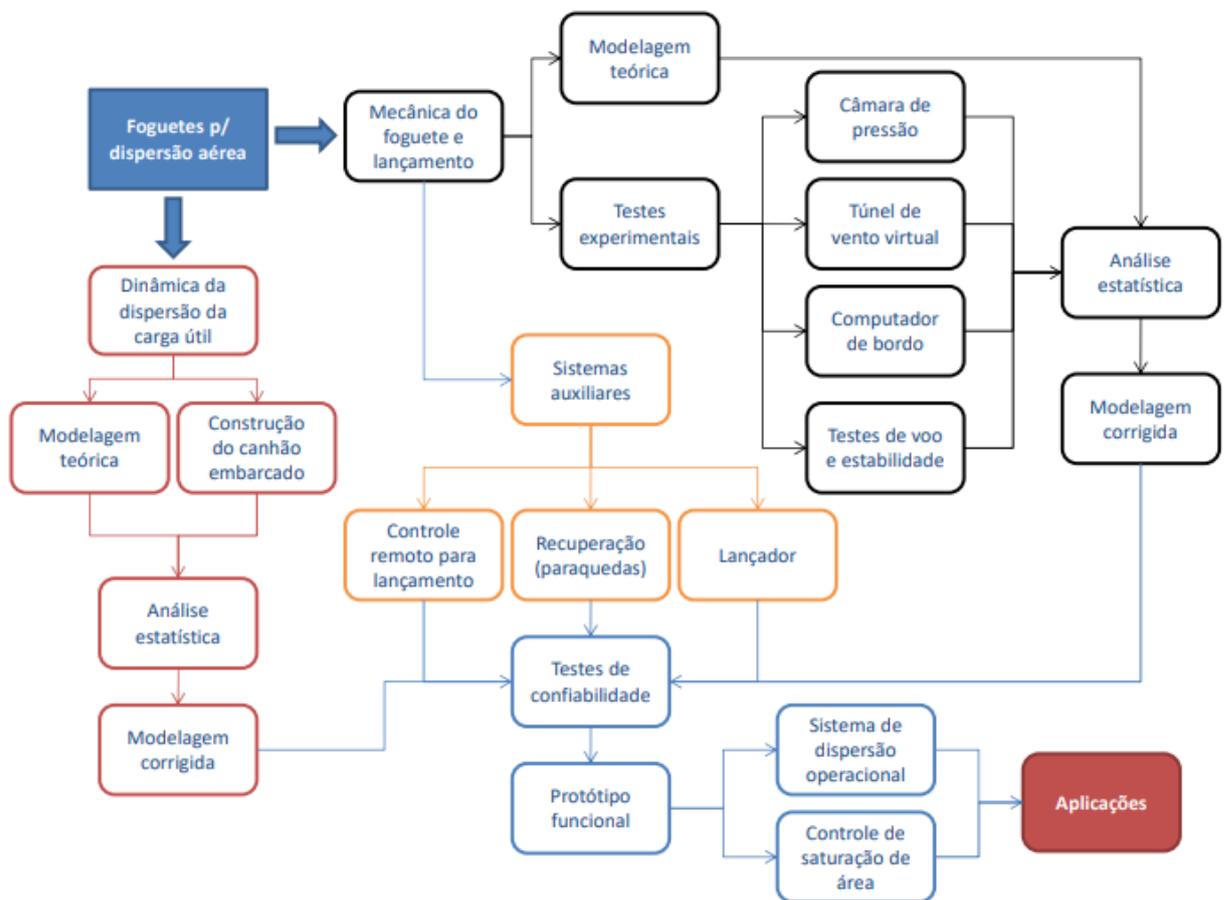


Fonte: Autor (2020).

Em linhas gerais, esses são os aspectos basilares sobre o funcionamento de um foguete movido a água pressurizada, contudo, para que se possa decolar e cumprir com a missão pretendida, sistemas auxiliares como o de abastecimento, pressurização, lançamento, orientação de voo, bem como recuperação, são necessários. Isso sem falar no sistema de dispersão de sementes embarcado. Dessa maneira, para cada sistema auxiliar acima citado, é mister detalhar

os aspectos de projeto, construção e funcionamento, uma vez que alguns deles demandaram inovações no campo. Contudo, dado o grau de complexidade técnica para o desenvolvimento de todos os sistemas relacionados à dispersão aérea por foguetes, que acaba fugindo das diretrizes interdisciplinares que regem esta pesquisa pelo seu grau de especificidade, decidiu-se sintetizar os procedimentos metodológicos no formato de um fluxograma (Figura 5) para melhor compreensão do processo. Por outro lado, as informações detalhadas sobre a construção dos foguetes podem ser obtidas no Apêndice I.

Figura 5: Fluxograma do desenvolvimento dos foguetes dispersores



Fonte: Autor (2024).

Inicialmente, pensando nos métodos de construção, assim como no seu funcionamento, foi elaborado um projeto detalhado em CAD, através do *software VariCAD*. Tomando como premissa o baixo custo, optou-se pela confecção das câmaras e carenagens utilizando garrafas pet de corpo reto com reforço em fibra de vidro e as peças dos mecanismos e válvulas em acrilonitrila butadieno estireno – ABS, a partir da tecnologia FDM (impressão 3D pelo método de modelação por deposição fundida, acrônimo em inglês).

O foguete é constituído de: (1) uma câmara de exaustão, responsável por sua propulsão; (2) um canhão de ar comprimido; (3) um paraquedas; (4) um bico; (5) aletas estabilizadoras de voo. O canhão de ar comprimido, por sua vez é construído tendo três partes: uma câmara de ar comprimido, uma válvula de abertura rápida e um cilindro de armazenagem de carga útil (para o caso, cápsulas contendo sementes).

A laminação foi feita com duas camadas de tecido de fibra de vidro (tipo E), com densidade de 200 g/m² e resina poliéster ortoftálica catalisada. As aletas foram confeccionadas a partir de chapas de poliestireno, com espessura de 2 mm.

Já a válvula de abertura rápida utiliza uma mola com constante elástica medida em 65.503 N/m, o que confere à válvula uma capacidade de correta operação até um limite de 300 Psi de pressão na câmara de ar comprimido do canhão.

O dispositivo de recuperação é um paraquedas simples, obtido por um recorte octogonal em tecido *Faillet* com 1,35 m, medido entre duas arestas opostas, amarrado com cordas finas (5 mm de diâmetro) com 1,5 m de comprimento em cada vértice através de ilhós. Para compor o sistema de recuperação, um fio fino de nylon é preso à tubeira, de forma que após a dispersão das sementes e completa abertura do paraquedas o foguete pode ser rebocado de volta por um molinete e aterrissar próximo ao local de lançamento, sem danos à sua estrutura.

Para a confecção do computador de bordo, foi utilizada a plataforma *Arduino Nano*, que possui um microcontrolador ATmega328, suficiente para a rotina pretendida, associado a um módulo de radiofrequência *NRF24L01*, que opera em uma frequência de 2,4 MHz, e dois servomotores como mecanismos de ação, um para abertura do bico e ejeção do paraquedas e o outro para o acionamento da válvula de abertura rápida, responsável pela dispersão da carga útil.

Como a dinâmica do foguete não permite a utilização de acelerômetros digitais ou outros dispositivos que funcionem tendo como base o vetor gravitacional, dados os regimes de aceleração e queda livre da trajetória, utilizou-se como base para determinar o apogeu da trajetória um temporizador programado a partir de uma modelagem desenvolvida para esta finalidade. O temporizador é acionado remotamente, tendo o mesmo comando utilizado para efetuar o lançamento, em sincronia. Isso conferiu precisão e simplicidade ao computador de bordo.

Com todos os elementos confeccionados, a montagem final foi feita (Figura 6), realizando-se em seguida o procedimento de testes de vazamentos, ejeção do paraquedas e disparo do canhão.

De forma a efetuar previsões confiáveis sobre a dispersão, bem como sobre o padrão

de espalhamento das capsulas disparadas e sua distribuição em solo, foi necessário desenvolver uma modelagem matemática específica. O projeto foi submetido a um túnel de vento virtual, simulado pelo *software Autodesk Flow Design*, onde se pôde observar as zonas de alta e baixa pressão, dando bons indícios de estabilidade, bem como obter um coeficiente de arraste aerodinâmico fidedigno.

Figura 6: Foguete de teste montado



Fonte: Autor (2020).

Sumariamente, o funcionamento se inicia pelo abastecimento do foguete, que ocorre pela tubeira, através de um sistema de lançamento, primeiramente com a injeção de água e, posteriormente, de ar comprimido. As câmaras de exaustão e de ar comprimido são conectadas por uma válvula. Ao injetar ar na câmara de exaustão, a válvula permite a pressurização da câmara de ar comprimido do canhão. Uma vez fechada essa válvula, apenas a câmara de exaustão do foguete é pressurizada. Atingida a pressão desejada, respeitados os limites de segurança, ao se acionar o controle remoto, o sistema de lançamento destrava o foguete através de um mecanismo pneumático, e o ar comprimido presente na câmara de exaustão empurra a massa de água e a massa de ar presentes na câmara, até que a pressão no interior da câmara se

iguale a pressão atmosférica. Por efeito da terceira lei de Newton, o foguete é empurrado na direção oposta, perfazendo, após a aceleração, que se dá de maneira retilínea, uma trajetória balística.

O computador de bordo, contendo um temporizador preciso (precisão aferida na escala de milésimo de segundo) é dotado de um dispositivo de comunicação via radiofrequência, que recebe a informação do instante do acionamento do sistema de lançamento, a partir disso, inicia a contagem do tempo do lançamento até o apogeu da trajetória, que é previamente programado, tendo como fonte o simulador desenvolvido para prever a trajetória do foguete, bem como o padrão e posição da dispersão no solo.

A ejeção da carga útil ocorre frontalmente, após o nariz se desacoplar do foguete e o paraquedas ser expelido. Comandado pelo computador de bordo com um temporizador preciso, o canhão de ar é ativado por uma rotina onde, ao atingir o apogeu da trajetória, o computador aciona o servomotor do mecanismo de abertura do nariz, que, uma vez preso externamente ao corpo do foguete por um par de tiras elásticas, é desacoplado, liberando então o paraquedas, que começa a se desdobrar para abertura. Após isso, com atraso suficiente para que o canhão de ar fique desobstruído, um segundo servomotor do mecanismo de disparo é acionado, dispersando ativamente as sementes em um padrão de distribuição gaussiana.

3.2 Peletização e germinação de sementes: ensaios de laboratório

Para os estudos inerentes à germinação de sementes foram conduzidos alguns ensaios. Para atestar a qualidade do encapsulamento das sementes, várias composições foram testadas em bandejas sementeiras. Para garantir que não houvesse interferência do substrato na taxa de germinação, nos ensaios com as sementeiras, foi utilizado algodão sobreposto com fibra de coco (*Cocos nucifera*) para essa função.

Originalmente a peletização foi testada utilizando sementes de milho (*Zea mays*) algodão desfiado, carvão vegetal moído e aglutinados utilizando-se uma cola obtida a partir do cozimento de goma de tapioca (Figura 7). A cola tem uma receita de uma parte de goma para quatro partes de água, onde se aquece a mistura até que uma consistência de gel é atingida.

Após envolver a semente com o composto supracitado, deixava-se secar por um dia ao ar livre antes de iniciar os testes nas sementeiras. Nos testes em laboratório, com irrigação manual com um pulverizador, foram dispostas mil sementes peletizadas e pouco mais de 25% das sementes peletizadas germinaram. Ao se investigar a razão de uma taxa tão baixa, verificou-se que o aglutinante a base de tapioca acabava provocando uma impermeabilização no encapsulamento, mantendo a semente seca e impossibilitando a quebra da dormência. Tal fato

levou ao abandono dessa técnica.

Figura 7: Semente germinando em pellet de tapioca



Fonte: Autor (2020).

Em substituição à cápsula de tapioca, testou-se um novo composto a base de papel *Kraft* e pó de casca de coco (*Cocos nucifera*) e aglutinados com argila bentonita e água até atingir uma textura pastosa suficiente para manuseio e encapsulamento das sementes. A mesma quantidade de sementes (*Zea mays*) foi testada, com o mesmo método de irrigação e com o mesmo período de secagem, de um dia, variando-se a cada ensaio as proporções de argila, papel e pó de coco (*Cocos nucifera*).

A mistura mais bem sucedida foi a que continha duas partes (em volume) de pó de coco (*Cocos nucifera*), uma parte de argila bentonita e uma parte de papel *Kraft*, recebendo, ainda, doses discretas, de alguns gramas de cravo da Índia (*Syzygium aromaticum*) moído, com o intuito de funcionar como defensivo contra predação. Nesse cenário, a taxa de germinação das sementes peletizadas foi de 67,4%, em oposição às sementes nuas, que contaram com uma taxa de germinação de 57,9%. Na Figura 8 é possível visualizar os ensaios iniciais sobre a viabilidade da receita dos *pellets*.

De posse dessas informações, foi desenvolvida uma estufa automatizada para simular algumas condições ambientais encontradas na fazenda Salambaia, local onde se dariam os ensaios de campo. O gerenciamento da estufa foi realizado com um microcontrolador *ATmega328* disposto na plataforma *Arduino Nano*, um módulo de tempo real RTC (*Real Time*

Clock), uma válvula solenoide para o controle de irrigação, 12 micro aspersores e 4 lâmpadas *full spectrum* de 28W de potência, cada. A estrutura foi confeccionada a partir de tubos de PVC de 20 mm e recoberta com um filme plástico transparente para melhor controle de irrigação, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 8: Sementeira com testes preliminares de encapsulamento



Fonte: Autor (2020).

Figura 9: Estufa automatizada



Fonte: Autor (2021).

Uma vez construída a estufa, foi medida a vazão média dos aspersores, o que resultou numa medida de 150 ml por minuto por aspersor. Como no total foram utilizados 12 aspersores, contabilizou-se uma vazão total de 1,8 l/min. Conhecendo a vazão e a área a ser irrigada, 1,35 m², foi possível dosar a quantidade de água, repetindo-se dia a dia, com o devido rigor de tempo, as condições pluviométricas encontradas nos meses de maio e junho do ano de 2017 na estação meteorológica instalada na fazenda Salambaia.

O período de insolação também pôde ser simulado utilizando as lâmpadas *full spectrum*, contornando qualquer sombreamento eventual no local de instalação da estufa. Os substratos utilizados no experimento foram recolhidos, também, na fazenda Salambaia, exatamente nos mesmos locais onde seriam instalados os experimentos de campo. As amostras foram recolhidas em três condições distintas de degradação: duas moderadas, e uma alta, como se verificará na etapa dos ensaios de campo (Figura 10).

As condições de degradação se distinguem pela quantidade de vegetação em regeneração, sombreamento e serrapilheira. A amostra 1 (Solo 1), com alto índice de degradação, tem característica de solo exposto, sem vegetação ou serrapilheira. A amostra 2 (Solo 2) apresenta retirada em local com indivíduos de grande porte ao redor, minimizando a incidência solar direta com concentração baixa de serrapilheira comparada à amostra 3 (Solo 3). Na amostra 3, indivíduos de porte médio faziam o sombreamento do solo, que apresenta uma quantidade de serrapilheira nitidamente superior a amostra 2, compondo mais de 50% dessa amostra de solo recolhida.

Figura 10: Separação de amostras de solo no interior da estufa



Fonte: Autor (2021).

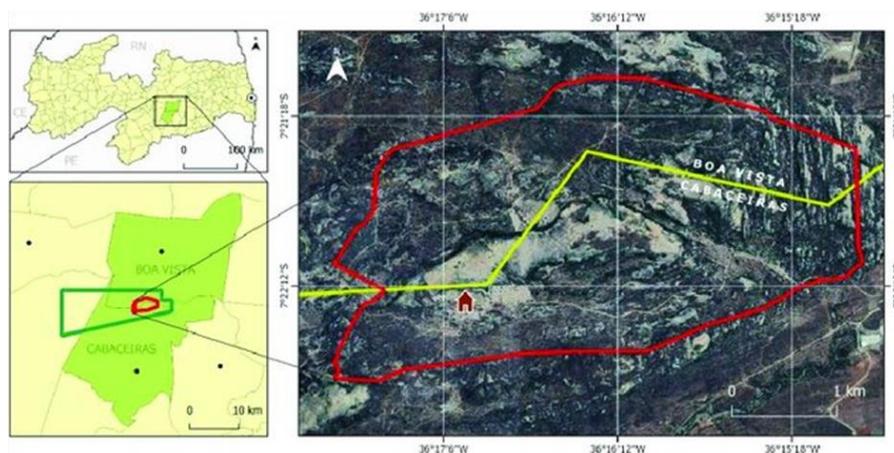
Dessa maneira as sementes de controle (nuas) e peletizadas foram depositadas sobre o substrato, perfazendo três parcelas, cada uma com uma amostra de solo, Figura 10. No caso o experimento ocorreu com as espécies selecionadas, pinhão bravo (*Jatropha mollissima*), catingueira (*Cenostigma pyramidale*) e mororó (*Bauhinia cheilantha*), justificadas anteriormente, salientando-se que se trata de espécies pioneiras e nativas. Não foi efetuado nenhum processo prévio de quebra de dormência em qualquer das amostras de sementes, peletizadas ou não e o processo de peletização foi o mesmo descrito para as sementes de milho.

O experimento teve uma duração exata de 2 meses, contando com amostras de 20 sementes peletizadas de cada espécie para cada amostra de solo. Para referência, os Solos 1, 2 e 3 representam as amostras descritas anteriormente.

3.3 Peletização e germinação de sementes: ensaios de campo

Os ensaios de campo, constituem, sobremaneira, o monitoramento de sementes *in loco*, que ocorreram na fazenda Salambaia (Figura 11), sem interferências posteriores à dispersão. Em um primeiro momento foi realizado um teste com as sementes encapsuladas dispostas na superfície do solo, sem qualquer método rigoroso de plantio, de modo a simular a dispersão aérea pretendida. Foi utilizada a receita de tapioca e o experimento teve seu início fora do período chuvoso, visto que esse ensaio ocorreu em meados de novembro de 2021. Tal ensaio ocorreu em concomitância com os ensaios de laboratório para a receita de tapioca. Foi eleita, para tanto, uma área representativa com três diferentes condições de preservação designadas para a observação. Essas zonas atendem as condições de moderada e alta degradação para efeitos de comparação e são os mesmos locais de onde foram recolhidas as amostras de solo para os ensaios em laboratório.

Figura 11: Mapa da fazenda Salambaia



Fonte: Souza et al. (2023).

As áreas foram dimensionadas em 9 m² (3x3 m) e cada semente depositada foi sinalizada com uma bandeirola indicando sua posição e espécie, num padrão geométrico simples (fileiras) de modo a simplificar o monitoramento, conforme se vê nas Figuras 12, 13 e 14. A amostra constituiu-se de 10 sementes peletizadas de cada espécie (*Jatropha mollissima*, *Cenostigma pyramidale* e *Bauhinia cheilantha*), acompanhadas de 10 sementes nuas, igualmente enfileiradas, funcionando como controle, totalizando 60 sementes em cada área.

Figura 12: Área de testes com degradação alta



Fonte: Autor (2021).

Figura 13: Área de testes com degradação moderada



Fonte: Autor (2021).

Figura 14: Área de testes com degradação moderada



Fonte: Autor (2021).

A partir dos resultados tanto de campo, quanto de laboratório envolvendo o encapsulamento a base de tapioca, verificou-se, como dito, a necessidade de modificação do método de encapsulamento. Dados os resultados mais significativos em laboratório com o *pellet* de argila bentonita, papel *Kraft* e pó de coco (*Cocos nucifera*), um novo experimento em campo foi planejado e realizado.

O experimento, nesse momento, consistiu em duas áreas, uma cercada, para controle e outra aberta, sem qualquer restrição de uso. Ambas as áreas apresentam um índice de degradação semelhante, onde a área de controle se deu exatamente no mesmo local indicado na Figura 12. Na área de controle, Figura 15, como dito, o acesso e uso do solo foi restringido por uma cerca de trama fina (geralmente utilizada na construção de galinheiros), para impedir a entrada, inclusive, de animais de pequeno porte. As sementes foram depositadas na superfície, replicando o estudo anterior. Sessenta sementes foram utilizadas nesse experimento, sendo 20 de cada espécie (*Jatropha mollissima*, *Cenostigma pyramidale* e *Bauhinia cheilantha*), onde para cada espécie, 10 sementes foram encapsuladas e 10 não apresentando qualquer tratamento, servindo, então, como amostra de controle.

O experimento teve início em maio de 2022, coincidindo com o início do período de maior precipitação pluviométrica para a região do Cariri paraibano. Como nos demais experimentos realizados, não houve qualquer procedimento proposital destinado a quebra da dormência das sementes antes da deposição em campo.

Na segunda área, a dispersão das sementes foi realizada utilizando-se o foguete de dispersão estimando-se o local de deposição das sementes conforme as simulações realizadas.

Nessa etapa não foram dispersas sementes sem encapsulamento, a amostra consistiu em 90 sementes, sendo 30 de cada espécie (*Jatropha mollissima*, *Cenostigma pyramidale* e *Bauhinia cheilantha*).

Figura 15: Área de controle



Fonte: Autor (2022).

O método de monitoramento foi feito a partir da observação visual e respectiva contagem das plântulas. A área de lançamento e dispersão já contava com um cercado de madeira, medindo aproximadamente 30 metros de largura por 60 de comprimento, o que ajudou a delimitar a área, porém, sem restringir a circulação de animais.

Os lançamentos foram realizados no canto da área cercada, com uma inclinação de cerca de 85° em relação ao solo, visto que a zona de dispersão não permitia lançamentos mais oblíquos. O foguete de dispersão contava com 2,2 kg de massa, vazio, e foi lançado (Figura 16-a) com cerca de 2 litros de água, aproximadamente 1/3 do volume da câmara de exaustão a uma pressão de 210 Psi, equivalente a pouco mais de 14 atmosferas. O canhão de dispersão, a bordo do foguete foi calibrado a uma pressão de 140 Psi. Nessas circunstâncias, a simulação mostrava a abrangência do padrão de dispersão dentro dos limites da zona pretendida.

O foguete realizou seu voo em conformidade rigorosa com o que fora planejado. A ascensão aconteceu de forma estabilizada com o disparo do canhão sendo efetuado no apogeu da trajetória, indicando ótimo funcionamento do computador de bordo. Constatou-se, de modo visual, pelos presentes, que a queda das sementes se deu dentro dos limites da zona cercada, como pretendido.

O sistema de recuperação (Figura 16-b) se mostrou eficiente, com perfeito sincronismo entre a abertura do bico, disparo e abertura do paraquedas. O reboque por molinete também teve uma boa performance, não deixando o foguete à mercê do vento, tendo a recuperação ocorrida sem avarias, permitindo a reutilização completa e imediata do sistema.

Figura 16: Lançamento e recuperação do foguete de dispersão



Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Sistema de dispersão aérea

O foguete dispersor apresenta um comprimento de 2,00 m e massa de 2,200 kg, com câmara de exaustão com volume de 6,100 litros e câmara do canhão com 2,000 litros, com capacidade de carga na ordem de 250 g. Nos testes de lançamento, o foguete realizou seus voos em conformidade com o que fora planejado. A ascensão aconteceu de forma estabilizada com o disparo do canhão sendo efetuado no apogeu da trajetória, indicando a boa precisão da modelagem.

Um aspecto importante de se destacar é que, utilizando-se colas a base de poliuretano (PU) no processo de colagem das garrafas para confecção das câmaras dos foguetes, foi detectado um limite de 200 Psi de pressão máxima, a partir disso, a estrutura falha e verificam-se vazamentos nas câmaras. Com esta pressão é possível conseguir um alcance da ordem de 200 metros para um foguete otimizado com 1,4 kg e uma carga de 120 g. Utilizando-se resina ortoftálica para colagem das garradas, a mesma utilizada para laminação com fibra de vidro, aumentou-se o limite, desconhecido neste estudo, uma vez que os limites de pressão para uma operação segura foram definidos por outros componentes do sistema de lançamento, como por exemplo as mangueiras de conexão, operando com segurança com um limite de 380 Psi, com alcance atingindo cerca de 350 metros para o mesmo foguete otimizado.

Novos ensaios acerca da construção dos foguetes, ainda não consolidado, mostrou potencialidades na confecção das câmaras sem o uso das garrafas PET, minimizando o peso, sendo a laminação feita diretamente sobre um molde tubular. A resina utilizada, por sua vez, é uma resina epóxi, e mais camadas de tecido de fibra de vidro são necessárias à vedação hermética necessária. Estima-se que foguetes mais leves e mais resistentes sejam possíveis com essa técnica, necessitando de um sistema de lançamento mais robusto também.

Quanto ao sistema de recuperação, esse se mostrou eficiente, com perfeito sincronismo entre a abertura do nariz, abertura do paraquedas e disparo da carga útil. O reboque por molinete também teve uma boa performance, não deixando o foguete à mercê do vento, tendo a recuperação ocorrido sem avarias, permitindo a reutilização completa e imediata do sistema. É válido destacar que o reboque se inicia ainda no ar, logo após a dispersão das sementes. Isso faz com que o foguete “aterrisse” pr

Os aspectos críticos na validação da modelagem proposta recaem sobre a verificação da velocidade de exaustão de matéria (água e ar comprimido) pela tubeira do foguete, visto que os demais já encontram estudos suficientes, precisos e consolidados na literatura da mecânica

clássica há alguns séculos, uma vez que tratam sobre a dinâmica de projéteis.

Algumas proposições experimentais anteriores sugeriam a construção de equipamento específico para medir indiretamente a velocidade, como o uso de um tubo de *Pitot* para aferição da velocidade a partir da velocidade de escoamento do ar ou por efeito *Doppler* onde se insere um dispositivo emissor de som no foguete a uma frequência específica e em solo é captado tal som, analisando-se a variação de frequência devido à velocidade imprimida à fonte sonora. Tais aparatos não mediriam, ainda que indiretamente, a velocidade de escoamento, mas sim a velocidade do próprio foguete e tais resultados seriam verificados com a previsão teórica. Nesse ponto, uma ferramenta consolidada e pronta vem substituir todos esses instrumentos embarcados, que é a análise por vídeo das grandezas físicas envolvidas na dinâmica do foguete. Para tanto, se utilizou o *software Tracker*, que conta com ferramental facilitado para tais proposições (Figura 17).

Figura 17: Medição da velocidade por análise de vídeo



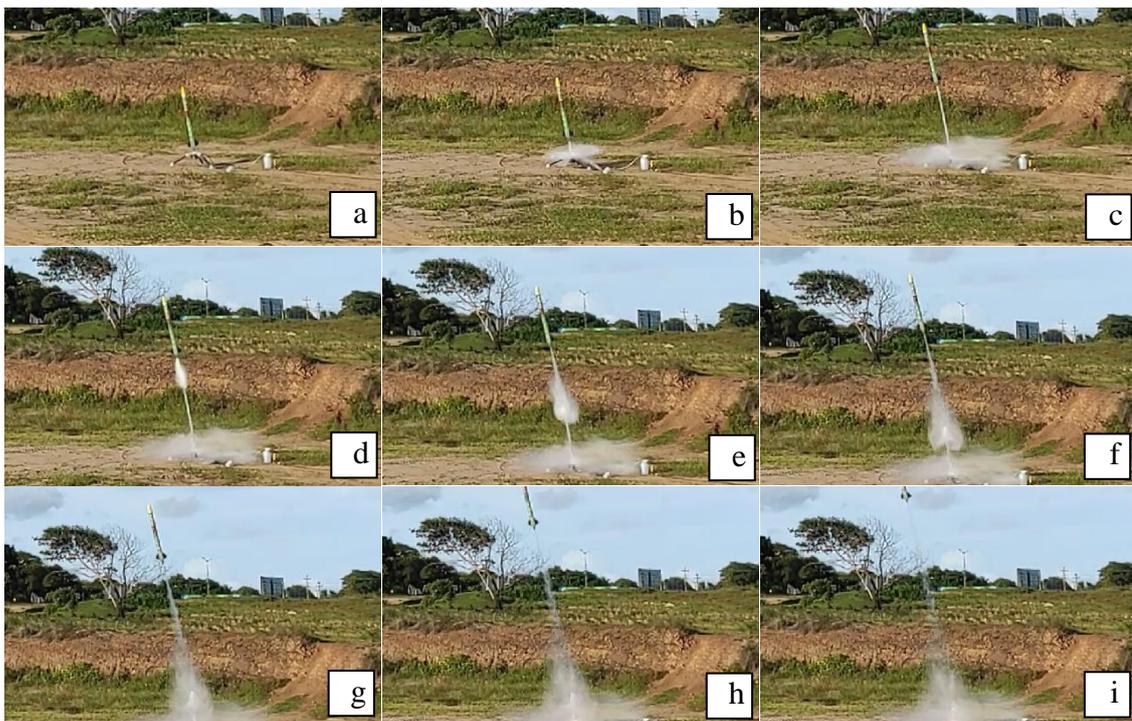
Fonte: Autor (2021).

Dessa maneira, os testes de voo foram filmados, de forma a quantificar grandezas como aceleração, velocidade e posição dos foguetes, além de se avaliar a qualidade do voo visualmente. *In loco* se verificou a estabilidade aerodinâmica do foguete, corroborando a análise prévia em túnel de vento virtual, e o funcionamento adequado dos sistemas de lançamento, dispersão e recuperação. Para uma análise mais apurada, procurou-se instalar a câmera em ângulo de visada perpendicular ao plano de trajetória do foguete, privilegiando, sobremaneira, o período acelerado do movimento. Foram anotadas as configurações de voo, como a massa do

foguete vazio (sem água), volume de água abastecido, pressão da câmara e comprimento do foguete. Esses dados servem, tanto para calibração dos parâmetros geométricos do *software* de análise de vídeo – *Tracker*, quanto para alimentar a entrada do simulador.

Os vídeos gravados em alta definição e em câmera lenta foram essenciais para um entendimento mais acurado da fenomenologia envolvida no processo de ejeção de massa pelos foguetes movidos à água pressurizada (Figura 18). A título de exemplificação pode-se comparar a análise de um dos lançamentos com a sua respectiva simulação. Na Figura 19 pode-se observar a curva da velocidade pelo tempo, medida quadro a quadro e na Figura 20 a curva simulada. No *software* de análise é possível escolher um ponto de massa de referência, marcando-o a cada quadro e as grandezas cinemáticas são automaticamente calculadas. O *software* gera uma tabela e um gráfico com as grandezas de interesse.

Figura 18: Compêndio de lançamento



Fonte: Autor (2021).

Após várias análises, como pretendido, foi possível corrigir as simulações preliminares que traziam muitas situações ideais, o que incorriam numa série de inconsistências os resultados esperados entre os dados observados. Dada a escassez da literatura para essa classe de foguetes, foi necessário trilhar todo o caminho basicamente do início. A revisão bibliográfica se deu no sentido de retirar dos textos publicados as informações necessárias à elaboração de simuladores e em nenhum dos casos houve uma correspondência satisfatória entre simulação e dados

observacionais. De outra perspectiva, utilizou-se os simuladores disponíveis ou acessíveis e a mesma inconsistência fora observada.

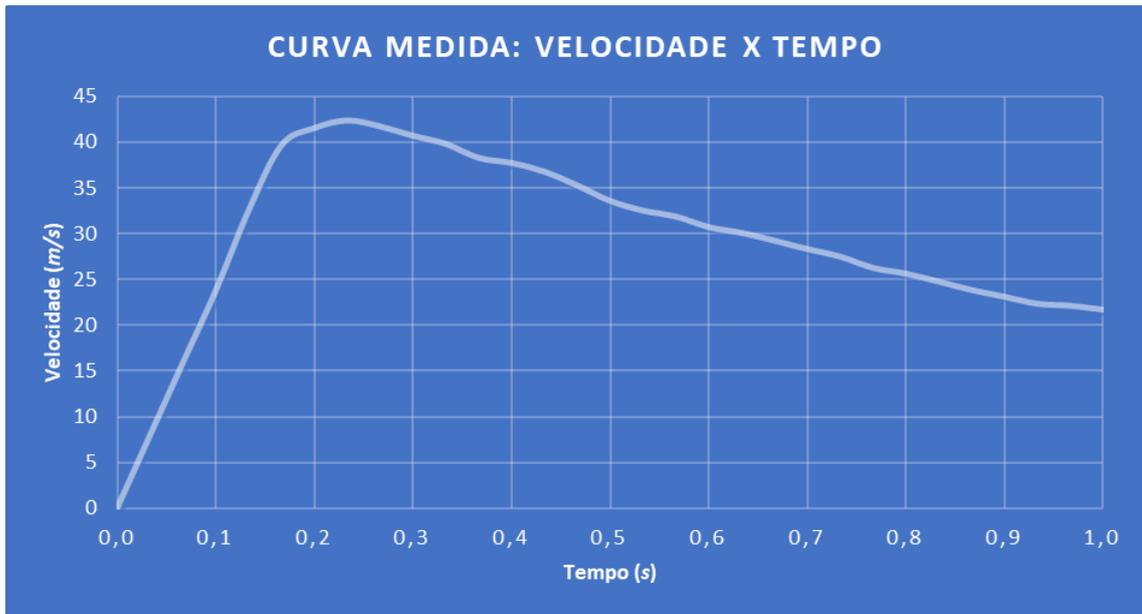
Nesse contexto, a elaboração de um simulador, confeccionado a partir da modelagem matemática destacada com o devido rigor no Apêndice II, rendeu resultados esperados muito próximos aos dados observados, com um percentual de erro desprezível. Ao total 9 versões do simulador foram desenvolvidas até que se atingisse esse grau de precisão. Isso pois, à medida que se observavam os vídeos dos lançamentos, verificavam-se incongruências entre o comportamento observado e o comportamento simulado. É seguro afirmar, com base nas correções realizadas, é que se conseguiu paridade entre as tendências de comportamento dos resultados simulados em correspondência com a realidade.

Há de se fazer, todavia, uma ressalva em relação ao tecnicismo despendido ao realizar a modelagem que se refere o Apêndice II, uma vez que é predominante a linguagem matemática em nível relativamente sofisticado. Para que não houvesse qualquer prejuízo ao entendimento global, as ideias e os resultados são apresentados nesta seção, de maneira democrática.

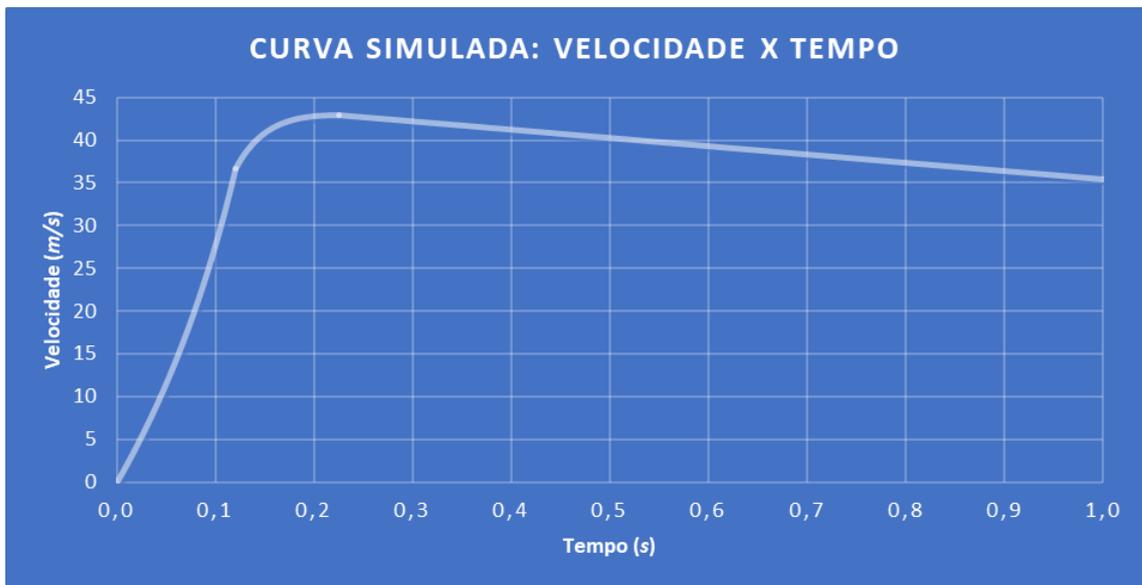
É possível perceber, com certa facilidade, a correlação de comportamento entre as curvas mostradas nas Figuras 19 e 20. Na região acelerada, por exemplo, nota-se o mesmo intervalo de tempo de cerca de 0,2 segundo entre o repouso e ponto máximo de velocidade atingido. A partir do ápice, o foguete entra em um regime inercial, apenas submetido à resistência do ar e à gravidade e a velocidade tende a decrescer monotonamente até que o foguete atinja o apogeu da trajetória. Esse trecho analisado, período acelerado, foi, de fato, o maior desafio para o entendimento correto do comportamento desse tipo de foguete, visto que os demais trechos obedecem a um regime de movimento balístico clássico de projétil.

Há de se destacar ainda uma falsa incoerência entre a simulação e os dados no que diz respeito ao decrescimento de velocidade, Nota-se um decrescimento da velocidade mais acentuado nos dados obtidos por análise de vídeo, do que o observado no gráfico da simulação. Tal pseudo-inconsistência pode ser notada devido a um fenômeno geométrico de percepção de perspectiva, uma vez que a câmera que capturou as imagens do foguete ficava pouco acima do plano da superfície e, à medida que o foguete sobe, o erro de medição cresce.

Tal fato acontece pelo fato de o elemento de calibração de distância, utilizado para o cálculo de deslocamento do *software*, ser o próprio corpo do foguete ainda parado na base de lançamento. No instante de maior velocidade, o foguete encontra-se a cerca de 6 metros do ponto de lançamento, onde o erro de leitura atribuído à perspectiva é insignificante, contudo, no instante 1,2 segundo, a altitude já ultrapassa os 30 m de altura, incorrendo num erro significativo, como se percebe da leitura dos gráficos.

Figura 19: Curva medida da velocidade em função do tempo

Fonte: Autor (2021).

Figura 20: Curva simulada de velocidade em função do tempo

Fonte: Autor (2021).

Outra análise cabível é que, após toda a ejeção de água e ar comprimido pelo foguete, o movimento é balístico, sendo sua descrição física bastante sedimentada pela literatura, não havendo qualquer controvérsia ou necessidade de correções na modelagem para essa etapa da trajetória, corroborando, mais uma vez o erro atribuído a diferença de perspectiva na tomada das medidas pelo método utilizado.

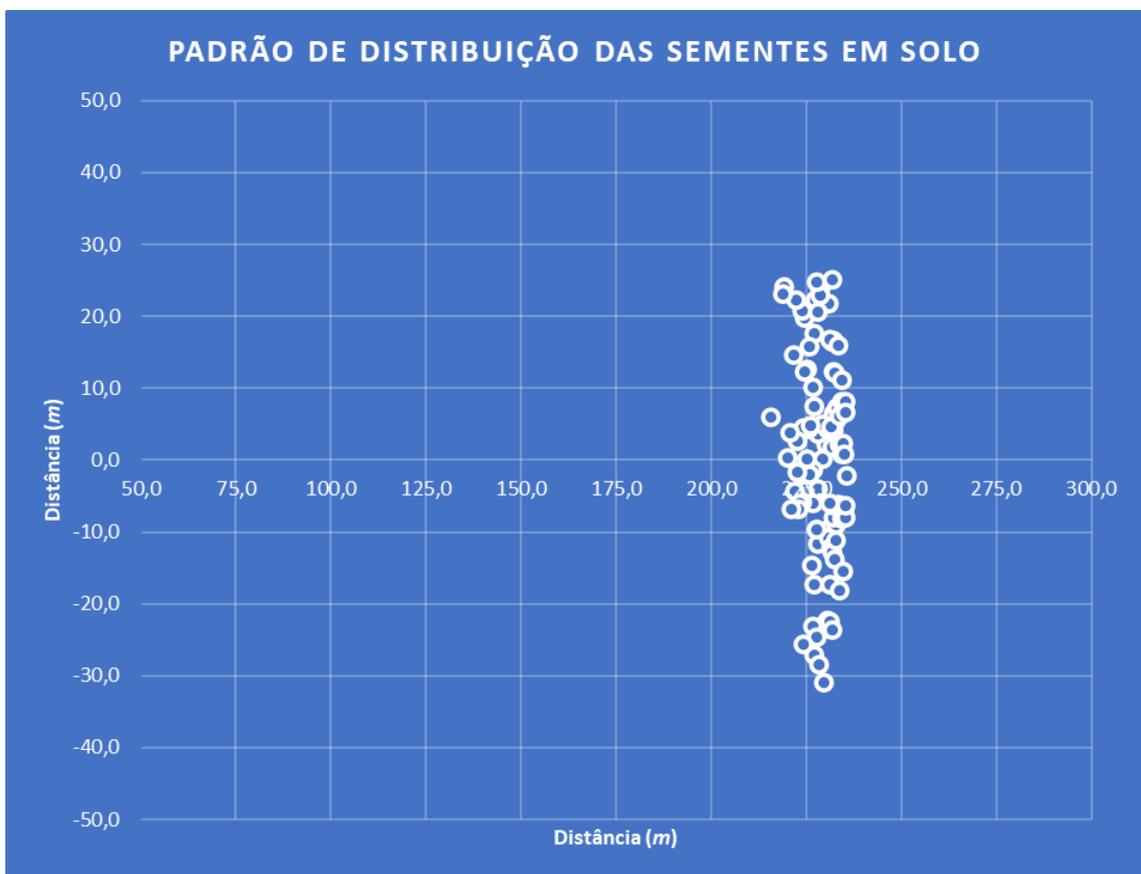
Dada a confiança obtida na qualidade das simulações, tem-se, portanto, um sistema

passível de repetibilidade dos resultados e uma ferramenta útil no quesito de planejamento e execução da dispersão aérea das sementes, visto que o fator de previsibilidade foi alcançado.

Pelos exames da dinâmica de voo do foguete, através da ferramenta de análise de vídeo, desde a trajetória acelerada, até a trajetória de voo livre, comparou-se os resultados das análises de vídeo, com as simulações e verificou-se um erro inerente à trajetória, da ordem de 1%, indicando um adequado grau de confiabilidade. No que diz respeito à dispersão aérea, dada sua natureza caótica, uma previsão determinística se tornaria muito complexa e custosa, sendo favorável, nesse caso, uma abordagem estatística, onde se pode afirmar com segurança a posição e tamanho da área a ser atingida, assim como o padrão de distribuição das sementes em solo.

Conhecendo-se o comportamento do foguete, assim como a natureza da dispersão pelo canhão de ar, e como esses dois fenômenos são indissociáveis dada a forma como foram construídos e executam a tarefa, foi possível incrementar o simulador com a previsão de deposição das sementes em solo (Figura 21).

Figura 21: Padrão de distribuição das sementes em solo



Fonte: Autor (2021).

Como outrora informado, esse protótipo apresenta limitações de operação. Tais

limitações, como todo sistema mecânico, se devem aos materiais e técnicas utilizados na sua construção. Nesse caso, as restrições primárias são dadas na pressão utilizada, volume de carga e inclinação de lançamento do foguete. Diz-se restrições primárias, pois tratam das capacidades físicas do sistema. Em sequência, restrições secundárias podem ser elencadas: volume de água e densidade da carga útil (sementes encapsuladas). São tidas como secundárias, uma vez que, apesar de não serem limitadas fisicamente pelo sistema, acabam por afetar drasticamente o seu desempenho. Em termos quantitativos pode-se relacionar alguns dados de interesse

- Pressão máxima: 380 Psi;
- Volume de água médio: 2 l;
- Inclinação mínima: 60°;
- Inclinação máxima 90°;
- Volume de carga útil: 490.000 mm³;
- Capacidade de cápsulas: 250;
- Alcance máximo teórico da dispersão: 250 m

Observa-se que, com esses dados estabelecidos é possível ter um controle de onde e como as sementes devem se depositar na superfície. Ao variar alguns parâmetros do lançamento, com auxílio do simulador, obtém-se sempre novas coordenadas de onde a sementes devem se depositar, juntamente com o envelope da dispersão. Esse fato se traduz numa ferramenta útil no que concerne ao planejamento do plantio. Uma vez dotado de um sistema aperfeiçoado, com controle de abastecimento de água, pressurização e inclinação automatizados, contando, ainda, com um compressor específico para a tarefa, é possível realizar um disparo a cada 15 minutos, sendo possível afirmar, com margem de segurança, que cada sistema tem capacidade para perfazer, em média, uma cobertura de 4 ha por dia. De outra perspectiva, considerando um envelope de dispersão de 50x25 m (1250 m²), são necessários, em média, 8 lançamentos para efetuar o plantio em 1 ha.

Nesse contexto, a utilização da técnica de nucleação é plenamente possível utilizando-se os foguetes aqui desenvolvidos desde que se respeite a correta eleição das espécies. Pois, em cada disparo ou liberação, uma área com envelope de aproximadamente 50x25 metros (1.250 m²) é saturada com um padrão gaussiano na distribuição de frequência espacial, conforme já mencionado. Em determinados cenários, a criação de miscelâneas no povoamento florestal, com padrões complexos, no lugar da uniformidade, é considerada um caminho a ser perseguido para a regeneração ecológica de florestas (OLIVER et al. 2016).

Com base nesse panorama, passa-se, então, a uma análise comparativa entre o método

aqui proposto e outros destinados à regeneração florestal por dispersão aérea de sementes.

A dispersão aérea de sementes é uma prática essencial em projetos de reflorestamento e restauração de ecossistemas degradados, com avanços notáveis no emprego de tecnologias inovadoras. As aeronaves tradicionais, como aviões e helicópteros, têm, historicamente, desempenhado protagonismo nesse processo. Uma análise sumária da literatura relacionada mostra que pouco se avançou no que diz respeito aos métodos e técnicas referentes da dispersão aérea de sementes, ocorrendo majoritariamente com aeronaves tripuladas (aviões ou helicópteros). Ocorre que nos últimos anos, com a popularização da tecnologia das aeronaves remotamente pilotadas ou RPA's (sigla em língua inglesa), comumente conhecidos por *drones*, novas ideias começam a ser ventiladas no âmbito das técnicas de dispersão aérea de sementes para fins agrícolas e ecológicos, oferecendo novas perspectivas na dispersão aérea de sementes.

Diante desse cenário, pode-se elencar, sumariamente, as principais vantagens e desvantagens no uso dessas tecnologias.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos veículos utilizados para dispersão aérea

Veículo	Vantagens	Desvantagens
Aviões	Alcance extensivo e eficiência em grandes escalas.	Falta de precisão e necessidade de infraestrutura para operação.
Helicópteros	Manobrabilidade e controle mais preciso.	Custo operacional elevado e menor capacidade de carga.
<i>Drones</i>	Precisão elevada, adaptação a terrenos complexos e menor impacto ambiental.	Capacidade de carga limitada e limitação de alcance.

Fonte: Autor (2024).

A utilização de *drones* na dispersão aérea de sementes tem atraído considerável atenção devido às suas vantagens tecnológicas. Os *drones* podem acessar áreas de difícil alcance, como encostas íngremes ou terrenos acidentados, onde métodos convencionais poderiam enfrentar limitações. Além disso, a precisão na distribuição de sementes por meio de *drones* é, notavelmente, aprimorada, o que pode permitir uma cobertura mais eficiente, assim como uma alocação mais estratégica dos recursos de reflorestamento.

De maneira análoga, aos foguetes podem ser conferidos os mesmos predicados atribuídos aos *drones*, a um custo operacional muito menor, assim como a facilidade na operação, muito mais simplificada.

Associando-se às tecnologias de sensoriamento remoto e georreferenciamento, é possível otimizar as rotinas de dispersão com os foguetes, atrelando-as, ainda, a zonas de maior interesse, que permitam menor número de lançamentos, economia de sementes e maximização da taxa de sucesso na implementação de projetos de reflorestamento.

O uso de foguetes para a dispersão aérea de sementes não é uma prática difundida ou documentada. A dispersão aérea de sementes é comumente associada, como visto, a veículos como aviões, helicópteros e, mais recentemente, *drones*. Foguetes têm sido historicamente associados a atividades espaciais, pesquisa científica e exploração espacial.

O uso de foguetes movidos à água tem sido limitado, principalmente devido às características particulares desse tipo de propulsão. Foguetes movidos à água pressurizada são uma categoria menos comum em comparação com os tradicionais propulsores de combustíveis sólidos ou líquidos. No entanto, seguem alguns exemplos notáveis de usos e experimentos envolvendo essa classe de foguetes:

1. Experimentos educativos e divulgação científica: frequentemente usados em atividades educacionais, como experimentos em escolas e eventos científicos. Eles oferecem uma maneira segura e visualmente interessante de demonstrar princípios básicos da física.
2. Competição de modelos de foguetes: algumas competições de modelismo de foguetes envolvem o uso de água pressurizada como propelente, onde os participantes projetam e lançam os foguetes com o objetivo de atingir máxima altitude, maior alcance ou precisão de pouso.
3. Atividades recreativas: em contextos recreativos, entusiastas frequentemente constroem foguetes movidos à água para diversão.
4. Investigação científica: em alguns casos, a propulsão à base d'água pode ser usada para pesquisas específicas em laboratório, para estudar os princípios de propulsão e fluxo de fluidos incompressíveis.

A ideia de utilizar essa classe de foguetes para a dispersão de sementes em áreas degradadas representa uma abordagem inovadora no campo da recuperação ambiental. A propulsão à base d'água traz consigo uma série de benefícios ambientais notáveis. Em comparação com foguetes movidos à propelentes tradicionais, esses, movidos à água pressurizada, não emite poluentes atmosféricos ou resíduos tóxicos, pois não há combustão,

contribuindo assim para uma pegada ambiental mais leve e sustentável, além de eliminar o risco de queimadas ou incêndios.

Além dos benefícios ambientais, a água é um recurso amplamente disponível e geralmente de baixo custo. Isso não apenas torna o projeto economicamente viável, mas também destaca a acessibilidade de um recurso essencial para o sucesso da iniciativa. A segurança associada ao uso de água como elemento de propulsão é outro aspecto crucial. A redução dos riscos no manuseio e transporte do foguete é uma vantagem significativa em comparação com outras técnicas.

De forma a dinamizar a discussão, uma análise *SWOT*, elencando as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças em relação à essa tecnologia foi montada, destacando as principais características.

Forças:

1. Sustentabilidade ambiental: Utilização de água como propulsor é ecologicamente amigável, reduzindo a pegada ambiental;
2. Custo acessível: O design dos foguetes é relativamente simples, tornando a montagem e manutenção fáceis, favorecendo a produção em larga escala, além disso a água é um recurso amplamente disponível e geralmente de baixo custo, contribuindo para a viabilidade econômica do projeto;
3. Segurança: Menor risco associado ao manuseio e transporte, além de eliminar o risco de incêndios e queimadas;
4. Precisão na dispersão: O projeto do foguete garante uma dispersão precisa e eficiente de sementes;
5. Velocidade de execução: Em poucos minutos uma área de 1250 m² pode ser saturada com sementes;
6. Flexibilidade de aplicação: Os foguetes são versáteis, não se limitando ao ambiente ou à espécie utilizada.

Fraquezas:

1. Limitação de alcance: Foguetes movidos à água têm um alcance limitado em comparação com outros tipos de veículos;
2. Capacidade de carga limitada: Restrições na quantidade de sementes que o foguete pode transportar devido às limitações de peso;
3. Dependência de condições climáticas: O desempenho pode ser afetado por condições climáticas, como vento, temperatura e umidade.

Oportunidades:

1. Pesquisa e desenvolvimento: Oportunidade para investir em pesquisa e desenvolvimento para aprimorar o design e a eficiência do foguete;
2. Colaborações estratégicas: Explorar parcerias com instituições de pesquisa, organizações ambientais e governamentais para impulsionar o projeto.

Ameaças:

1. Regulamentações e normas: Possíveis desafios relacionados a regulamentações locais ou internacionais que podem afetar o desenvolvimento e uso dos foguetes;
2. Concorrência com métodos convencionais: A resistência à adoção de métodos não convencionais pode representar uma ameaça ao projeto;
3. Aceitação pública: A aceitação pública do uso de foguetes para dispersão de sementes pode ser uma preocupação, exigindo esforços de conscientização.

Em resumo, a proposta de utilizar foguetes movidos a água para a dispersão de sementes apresenta uma abordagem inovadora e promissora para a recuperação de áreas degradadas. Observadas as potencialidades desse método proposto, destacam-se as vantagens do baixo custo de produção e operação, a sustentabilidade e a aplicabilidade em áreas de difícil acesso, como manguezais, encostas de serras ou vales, terrenos rochosos, áreas de várzea, áreas atingidas por queimadas, dentre outras, conferindo-se uma verdadeira oportunidade para o emprego dos foguetes.

4.2 Germinação

Os dados de germinação obtidos pelo experimento final descrito na seção 9.1 (germinação em estufa com índice pluviométrico simulado), estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Taxa de germinação em estufa com simulação pluviométrica

Espécie	Solo 1	Solo 2	Solo 3
<i>Jatropha mollissima</i>	60%	10%	0%
<i>Cenostigma pyramidale</i>	20%	0%	0%
<i>Bauhinia cheilantha</i>	10%	0%	0%

Fonte: Autor (2022).

A título de curiosidade, bem como de forma a atestar a qualidade das sementes foi repetido o experimento nos mesmos moldes, com modificação, no entanto, do índice de pluviosidade. Nesse caso, foi simulada uma chuva diária de 9 mm em três intervalos de 3mm, um matinal, um vespertino e um noturno, a cada 8 h. Pode-se observar uma das sementes em estágio avançado de germinação na Figura 22. Os resultados obtidos nesse experimento de controle estão dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Taxa de germinação em estufa com controle pluviométrico

Espécie	Solo 1	Solo 2	Solo 3
<i>Jatropha mollissima</i>	70%	50%	60%
<i>Cenostigma pyramidale</i>	40%	20%	40%
<i>Bauhinia cheilantha</i>	20%	20%	20%

Fonte: Autor (2022).

Figura 22: Germinação de *J. mollissima* em regime de abundância de água



Fonte: Autor (2022)

Tais resultados sugerem que um procedimento de quebra de dormência das sementes antes do plantio por dispersão pode aumentar a taxa de germinação. Os experimentos apontam para quebra de dormência a partir da elevação da taxa de umidade, mantida por um período crítico mínimo, e condições mais amenas de temperatura. Dessa forma, fica o destaque para um futuro experimento com irrigação simulada e controlada, bem como dispersão em campo, envolvendo uma quebra prévia de dormência, inclusive com variações de métodos e técnicas a fim de proceder com a quebra.

Para as etapas de campo não se usou essa estratégia para alavancar a taxa de germinação pela falta de compatibilidade entre as visitas ao local e a previsão pluviométrica na região, temendo um alto índice de mortalidade precoce devido a ausência de chuva nos dias subsequentes à dispersão, o que não seria um resultado representativo.

No que diz respeito ao experimento envolvendo a peletização com tapioca, iniciado em 2021, os resultados nas três áreas foram nulos, apesar da ocorrência de chuvas esparsas no período de novembro de 2021 a maio de 2022. Contudo, de maio a junho de 2022, após uma concentração mais intensa de chuvas na região do experimento, apenas na área com maior índice de degradação, a mesma indicada na Figura 12, se verificou alguma germinação. Nessa área 20% das sementes peletizadas de *Jatropha mollissima* germinaram, não sendo observada nenhuma outra germinação das sementes de controle, bem como das demais espécies até setembro de 2022. Tal resultado chama a atenção para um fator inesperado quando da elaboração do experimento: a qualidade de preservação da semente pelo *pellet*, mesmo estando exposto às condições ambientais por um longo período. Tal fato torna-se pertinente, pois, as sementes de controle da mesma espécie, sem encapsulamento, pereceram em pouco mais de um mês de exposição.

Em relação ao experimento de campo de número 2, com início em maio de 2022, com a peletização de papel, argila e coco, o monitoramento se deu de forma mensal entre junho e setembro de 2022. No que diz respeito à germinação das sementes, no experimento de controle foi contabilizada a germinação de 20% exclusivamente das sementes peletizadas de *Jatropha mollissima*, sem qualquer modificação no estado das demais, inclusive nas sementes nuas de controle. O resultado se repetiu para a área onde houve dispersão com foguete, taxa de 20% apenas para a espécie *Jatropha mollissima*. Pode-se observar os registros tanto dos brotos, como de algumas plântulas no compêndio mostrado na Figura 23.

Um novo ensaio com uma nova formulação, já com a etapa de laboratório finalizada, apontou para resultados preliminares expressivos. Nesse ensaio, utilizou-se sementes de *Jatropha mollissima* e *Bauhinia cheilantha*, com quebra da dormência prévia. Para as sementes

de *Jatropha mollissima* a quebra de dormência foi realizada pela imersão em água por 24h. Já as sementes de *Bauhinia cheilantha*, a quebra da dormência foi efetivada com o desponde da semente, no lado oposto ao embrião e imersão em água por 1h.

Figura 23: Compêndio de germinação



Fonte: Autor (2022).

A formulação da peletização conta com um núcleo de vermiculita e uma casca de bentonita e bagaço de cana seco e triturado. O diâmetro médio das esferas ficou um pouco maior que nas formulações anteriores, 4 cm, com uma massa média de 3 g. Os pellets foram dispostos em uma bandeja e a rega foi manual, com auxílio de uma pipeta graduada, dosada em 2 ml duas vezes ao dia por pellet. Nessa etapa do experimento, como dito, os resultados foram expressivos, repetindo-se 5 vezes os ensaios, obteve-se uma média de 98% na taxa de germinação em ambas as espécies.

Observando os resultados obtidos em laboratório juntamente com a observação da variação de alguns fatores, uma análise mais criteriosa sobre a baixa taxa de germinação para os ensaios em campo é cabida. A primeira questão, que mostrou maior impacto na discrepância entre os resultados em campo para os resultados em laboratório é justamente a quebra da

dormência. Apesar de os resultados se apresentarem tão distintos, a escolha pela não quebra de dormência nos ensaios de campo incidem na inviabilidade de aplicação da técnica durante sua execução. A razão disso se dá pela indisponibilidade de recursos para imediato plantio na iminência de chuva no local, uma vez que quebrada a dormência, o embrião inicia seu desenvolvimento e eventuais atrasos no plantio acabariam por inviabilizar a dispersão pelo método aqui proposto.

Outro fator que merece atenção é justamente a diferença nos regimes de variação térmica e umidade do ar aos quais foram submetidos os dois ensaios. Os ensaios de laboratório ocorreram na cidade João Pessoa (PB), cidade litorânea, em baixa latitude, submetida diretamente a ventos alísios, fatores que amenizam a amplitude térmica diária e uniformizam a umidade do ar a taxas elevadas. Cenário esse diferente do encontrado nos ensaios de campo, nos municípios de Cabaceiras e Boa Vista (PB), localizadas no Cariri paraibano, onde a amplitude térmica é muito mais significativa e a umidade do ar mais baixa.

Um terceiro fator, postumamente identificado, que pode ter afetado o desempenho das taxas de germinação das sementes, são as propriedades da argila bentonita no critério absorção/sessão de água. Por ser um material classificado como coloide (MORANDINI, 2014), apresenta grande potencial para absorção de água, porém não a cede com a mesma facilidade. Essa propriedade pode influenciar na quantidade de água disponível para as sementes absorverem água e o embrião se desenvolver.

De posse desses dados é possível, então, a verificação da adequação desse método frente aos métodos e técnicas presentes na literatura científica de interesse.

A taxa de germinação de *Jatropha mollissima*, embora modesta, é significativa considerando as condições adversas do bioma Caatinga. Essa espécie pode ter características fisiológicas que a tornam mais adaptada às condições áridas, como uma maior tolerância ao estresse hídrico e uma capacidade de utilização eficiente dos recursos disponíveis. Estudos anteriores indicam que a capacidade de germinação em condições adversas está relacionada à adaptação evolutiva de espécies nativas da Caatinga, que desenvolvem mecanismos de resistência ao estresse hídrico (SOUZA, 2020; NEVES & VIANA, 2008).

Essa taxa de 20% observada para *Jatropha mollissima* é comparável a outros estudos realizados em condições similares. Por exemplo, Figueiredo et al. (2012) observaram taxas de germinação de até 30% para algumas espécies nativas da Caatinga quando técnicas de melhoramento do solo foram combinadas com a semeadura direta. Lima et al. (2015) também relataram taxas de germinação superiores a 25% em áreas onde foi aplicada matéria orgânica para melhorar a estrutura do solo. Essas comparações indicam que, embora a técnica de

dispersão aérea por foguetes tenha potencial, melhorias nos métodos de encapsulamento e no manejo do solo podem aumentar significativamente as taxas de germinação.

Além dos estudos na Caatinga, diversas pesquisas em biomas semelhantes e em áreas secas fornecem um contexto mais amplo para avaliar as taxas de germinação. Por exemplo, em um estudo de Grossnickle e Ivetić (2017), a adição de polímeros de retenção de água aumentou significativamente as taxas de germinação e sobrevivência em áreas degradadas, alcançando até 40% de germinação em algumas condições. Este estudo destaca a importância de melhorar a retenção de umidade no solo, especialmente em áreas áridas onde a disponibilidade de água é limitada.

Em outro estudo, Harper et al. (2017) investigaram métodos de reflorestamento em áreas áridas na Austrália e encontraram que a utilização de sementes encapsuladas e a adição de polímeros de retenção de umidade melhoraram significativamente as taxas de germinação, alcançando até 40% em algumas condições. Esses resultados são comparáveis aos obtidos na Caatinga e sugerem que a adaptação de técnicas de encapsulamento pode ser crucial para aumentar as taxas de germinação em áreas áridas.

Newton et al. (2012) relataram que a combinação de técnicas de manejo do solo, como a adição de matéria orgânica e irrigação controlada, com a seleção de espécies nativas adaptadas a condições áridas, resultou em taxas de germinação superiores a 35% em áreas secas na América Latina. Esses resultados corroboram a importância de adaptar as técnicas de plantio às condições específicas do solo e do clima, bem como a necessidade de ajustes contínuos para otimizar os resultados.

O estudo conduzido por Piñeiro et al. (2013) mostrou que as taxas de sobrevivência das plântulas em plantio direto podem alcançar até 50% quando técnicas de manejo do solo, como a adição de matéria orgânica e irrigação suplementar, são empregadas. Grossnickle e Ivetić (2017) também destacam que a aplicação de técnicas complementares ao plantio direto, como o uso de polímeros de retenção de água, pode aumentar significativamente a taxa de sobrevivência em áreas semiáridas.

Isso mostra que os resultados obtidos não estão tão discrepantes do que é apresentado na literatura, conferindo credibilidade às técnicas destacadas nos ensaios.

A utilização de aditivos para melhorar a retenção de umidade no solo, como hidrogel e polímeros, mostrou-se eficaz em várias regiões áridas, aumentando a capacidade do solo de reter água e melhorando a taxa de germinação e sobrevivência das plantas (KRIBECHE et al., 2012). Em estudos realizados no sudeste da Espanha, as taxas de germinação foram significativamente aumentadas com o uso de técnicas de manejo adaptadas às condições áridas,

como a aplicação de adubo e a utilização de sistemas de irrigação de baixa intensidade (CHIRINO et al., 2009).

Nesse contexto, a dispersão aérea por foguetes utilizada neste estudo apresenta várias vantagens, como a capacidade de cobrir grandes áreas rapidamente e a possibilidade de acessar regiões de difícil acesso. No entanto, as taxas de germinação observadas indicam que há espaço para melhorias significativas. Uma das principais limitações identificadas foi a eficácia do encapsulamento das sementes. Estudos indicam que a composição do material de encapsulamento e sua capacidade de manter a umidade são cruciais para o sucesso da germinação (CHIRINO et al., 2009; GROSSNICKLE & IVETIĆ, 2017).

Comparando a técnica de dispersão aérea com foguetes com métodos de plantio direto, visto que tem abordagens semelhantes, observamos que o plantio direto permite um controle mais preciso das condições de semeadura, incluindo a profundidade de plantio e a proteção mecânica contra predadores. Estudos como os de Silva et al. (2020) e Figueiredo et al. (2012) mostram que o plantio direto, quando combinado com melhorias no solo, pode alcançar taxas de germinação significativamente superiores. Por exemplo, Silva et al. (2020) relataram taxas de germinação de até 35% em plantios diretos na Caatinga, destacando a importância de intervenções no solo, como a adição de matéria orgânica e irrigação controlada.

Figueiredo et al. (2012) relataram que o uso de técnicas de nucleação, juntamente com a adição de matéria orgânica, pode aumentar significativamente as taxas de germinação e sobrevivência das plântulas na Caatinga. Essas intervenções melhoram a qualidade do solo e proporcionam um microambiente mais estável para as sementes germinarem e se desenvolverem. Lima et al. (2015) também enfatizaram a importância da adição de matéria orgânica e o manejo adequado do solo para alcançar taxas de germinação superiores a 25% em áreas degradadas da Caatinga.

Os estudos realizados por Santos (2018) e Gonçalves (2017) destacam a viabilidade da técnica de nucleação para a recuperação de áreas degradadas, especialmente em regiões semiáridas e caatinga. A técnica demonstrou ser eficaz ao utilizar espécies xerófilas que apresentaram altos índices de sobrevivência e bom desenvolvimento em diferentes formatos de núcleos, como evidenciado pelo alto percentual de sobrevivência do xique-xique e do pinhão bravo. Além disso, a técnica de nucleação com poleiros artificiais mostrou-se promissora para a facilitação da dispersão de sementes e a regeneração natural, contribuindo para a diversificação de espécies e o recrutamento de plantas nativas em áreas com diferentes condições de conservação. As adaptações no plantio de mudas em diferentes tipos de solo e o uso de condicionadores, como hidrogel e bagana de carnaúba, também ressaltam a flexibilidade

e eficácia da nucleação, tornando-a uma abordagem sustentável e adaptável para a restauração ecológica. Essas evidências reforçam que a nucleação é uma técnica viável e eficaz para promover a recuperação de ecossistemas degradados, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a recuperação da biodiversidade (SANTOS, 2018; GONÇALVES, 2017).

Além disso, estudos de Sales (2008) sobre a revegetação de áreas degradadas da Caatinga destacam que a semeadura direta e o uso de mudas transplantadas em substrato enriquecido com matéria orgânica resultaram em taxas de sobrevivência de até 30%. A técnica de semeadura direta, quando associada a práticas de manejo do solo, como a adição de compostos orgânicos e a criação de microbacias de captação de água, mostrou-se eficaz em aumentar a taxa de germinação e o estabelecimento de plântulas (SALES, 2008).

Pesquisas realizadas em áreas secas ao redor do mundo, como os de Harper et al. (2017) e Vallejo et al. (2012), destacam a importância de técnicas adaptativas e o uso de novas tecnologias para melhorar as taxas de germinação e sucesso na restauração ecológica. Harper et al. (2017) investigaram métodos de reflorestamento em áreas áridas na Austrália e encontraram que a adição de polímeros de retenção de umidade e o uso de sementes encapsuladas melhoraram significativamente as taxas de germinação, alcançando até 40% em algumas condições.

Newton et al. (2012) relataram que a combinação de técnicas de manejo do solo, como a adição de matéria orgânica e irrigação controlada, com a seleção de espécies nativas adaptadas a condições áridas, resultou em taxas de germinação superiores a 35% em áreas secas na América Latina. Esses resultados corroboram a importância de adaptar as técnicas de plantio às condições específicas do solo e do clima, bem como a necessidade de ajustes contínuos para otimizar os resultados.

Um trabalho de regeneração florestal realizado na década de 80, tido como referência, tanto pelo seu ineditismo no Brasil, quanto pelo sucesso, é trazido à discussão. Trata-se de um extenso trabalho de semeadura aérea com sementes peletizadas com hidrogel de espécies pioneiras realizado na Serra do Mar (Mata Atlântica) em Cubatão-SP, apresentado por Pompéia et al. (1989), com intuito de recuperação da cobertura vegetal outrora degradada, tendo como uma das causas principais a emissão de poluentes atmosféricos pelo polo industrial de Cubatão – SP.

Em um estudo de acompanhamento sobre esse trabalho realizado em Cubatão - SP, Pompéia et al. (1992), monitorando os manacás-da-serra (*Tibouchina pulchra* e *Tibouchina mutabilis*) constatou que o incremento artificial do aporte de sementes nas áreas degradadas, por semeadura aérea, resultou num aumento significativo na regeneração das espécies quando

comparadas à regeneração natural.

Um dos resultados que se destaca nesse estudo é que após 180 dias de plantio, observou-se uma taxa de sobrevivência em campo, para as plântulas semeadas, da ordem de 0,1% em relação à quantidade de sementes lançadas. Já no intervalo de 6 meses a 2 anos do plantio, a taxa de mortalidade, dentre àquelas sobreviventes foi de 20%.

Como visto, Piñeiro et al. (2013) realizaram uma meta-análise de experimentos de campo em áreas secas, mostrando que as taxas de sobrevivência das plântulas em plantio direto podem alcançar até 50% quando técnicas de manejo do solo, como a adição de matéria orgânica e irrigação suplementar, são empregadas. Grossnickle e Ivetić (2017) também destacam que a aplicação de técnicas complementares ao plantio direto, como o uso de polímeros de retenção de água, pode aumentar significativamente a taxa de sobrevivência em áreas semiáridas.

A utilização de aditivos para melhorar a retenção de umidade no solo, como hidrogel e polímeros, mostrou-se eficaz em várias regiões áridas, aumentando a capacidade do solo de reter água e melhorando a taxa de germinação e sobrevivência das plantas (KRIBECHE et al., 2012). Em estudos realizados no sudeste da Espanha, as taxas de germinação foram significativamente aumentadas com o uso de técnicas de manejo adaptadas às condições áridas, como a aplicação de adubo e a utilização de sistemas de irrigação de baixa intensidade (CHIRINO et al., 2009).

A técnica de dispersão aérea por foguetes apresenta vantagens e desafios em comparação ao plantio direto. Estudos sobre plantio direto indicam taxas de germinação que variam conforme a espécie e as condições do solo. Por exemplo, Silva et al. (2020) observaram taxas de germinação de até 35% em plantios diretos utilizando espécies nativas da Caatinga, com técnicas de preparo do solo e adição de matéria orgânica. Essa técnica permite um maior controle sobre as condições de plantio, incluindo profundidade de semeadura e proteção contra predadores, fatores que podem aumentar as taxas de germinação.

A principal vantagem do plantio direto é a possibilidade de realizar intervenções diretas no solo, melhorando suas condições físicas e químicas para favorecer a germinação e o crescimento das plântulas. Técnicas como a aplicação de polímeros de retenção de água e a utilização de cobertura morta podem aumentar a retenção de umidade no solo, proporcionando um ambiente mais favorável para as sementes (CHIRINO et al., 2009). Além disso, a proteção mecânica contra predadores e a possibilidade de monitoramento constante permitem ajustes rápidos nas condições de cultivo, aumentando a taxa de sucesso.

Por outro lado, a dispersão aérea por foguetes oferece a vantagem de cobrir grandes áreas rapidamente, sendo especialmente útil em regiões de difícil acesso. No entanto, a eficácia

dessa técnica depende fortemente do design do encapsulamento e das condições ambientais no momento da dispersão. A taxa de germinação de 20% observada para *Jatropha mollissima* é promissora, mas indica a necessidade de melhorias nos métodos de encapsulamento e na seleção das espécies.

A incorporação de novas tecnologias, como a dispersão aérea por foguetes, representa um avanço significativo no campo da restauração ecológica. Essa abordagem pode ser particularmente eficaz em áreas vastas e de difícil acesso, onde métodos tradicionais de plantio seriam impraticáveis. A utilização de tecnologia de ponta para encapsular sementes com nutrientes e agentes de retenção de umidade pode aumentar a taxa de sucesso das iniciativas de revegetação (HARPER et al., 2017).

Adicionalmente, o uso de *drones*, ou aeronaves remotamente pilotadas, para monitorar e gerenciar as áreas revegetadas pode proporcionar dados em tempo real sobre as condições do solo e o desenvolvimento das plantas, permitindo ajustes rápidos e precisos nas estratégias de manejo (STAMATOPOULOS et al., 2024). Essas tecnologias podem complementar os métodos tradicionais, aumentando a eficiência e a eficácia dos programas de restauração ecológica.

Para aprimorar os resultados obtidos neste estudo, recomenda-se a realização de novos experimentos com ajustes nas técnicas de encapsulamento. A inclusão de aditivos que aumentem a retenção de umidade e a utilização de materiais biodegradáveis que liberem nutrientes gradualmente podem ser estratégias promissoras (HARPER et al., 2017; KRIBECHE et al., 2012). Além disso, comparar diretamente a eficácia da dispersão aérea com o plantio direto em diferentes condições ambientais pode fornecer informações valiosas para a escolha das melhores práticas de revegetação.

Os resultados deste estudo indicam que, embora a técnica de encapsulamento tenha mostrado algum sucesso com *Jatropha mollissima*, são necessários ajustes para melhorar as taxas de germinação de outras espécies. A alta degradação do solo e as condições ambientais adversas são desafios significativos que devem ser abordados para aumentar a eficácia dos projetos de revegetação.

Comparando a dispersão aérea com o plantio direto, verifica-se que ambas as técnicas possuem vantagens específicas e podem ser complementares, dependendo das condições do local e dos objetivos do projeto. A dispersão aérea por foguetes permite cobrir grandes áreas rapidamente e é especialmente útil em regiões de difícil acesso, mas suas taxas de germinação, como as observadas neste estudo, são inferiores às taxas reportadas para o plantio direto em condições otimizadas. Trabalhos como os de Silva et al. (2020), que observaram taxas de

germinação de até 35% com plantio direto, destacam a importância de intervenções no solo, que não são possíveis com a mesma eficácia na dispersão aérea.

Em um estudo bibliográfico mais recente, Kiama et al. (2023) fizeram um levantamento de casos de sucesso pelo mundo onde foi utilizada a técnica de semeadura aérea e constata que poucos estudos com a temática foram realizados nas regiões tropicais. Apesar de ser uma técnica com potencial, bem difundida e bastante utilizada nos países industrializados, no que diz respeito a projetos de reflorestamento de grandes áreas, e, principalmente, utilizada em locais onde o acesso é problemático, nas regiões tropicais existe um baixo interesse pelo método. Segundo os mesmos autores, os fatores que afastam o interesse pela técnica de dispersão aérea nas regiões tropicais são, justamente, as relativas baixas taxas de germinação (média de 38% dentre os trabalhos revisados) e estabelecimento (média de 17% dentre os trabalhos revisados) (KIAMA et al., 2023).

Estudos como os de Piñeiro et al. (2013) e Grossnickle e Ivetić (2017) mostram que técnicas de plantio direto, quando combinadas com melhorias no solo e manejo adequado, podem alcançar taxas de sobrevivência superiores a 40%, superando significativamente a taxa de germinação de 20% observada na dispersão aérea de *Jatropha mollissima*, contudo acabam por elevar o custo dos projetos de recuperação, situação que no atual cenário, pode ser superada por uma maior investida na dispersão aérea, de modo que se iguale em número a quantidade de plantas estabelecidas por unidade de área, a um custo significativamente menor.

O uso de tecnologias avançadas, como o sensoriamento remoto e melhoramento dos sistemas de peletização, para monitorar e ajustar as condições das áreas revegetadas, têm capacidade para potencializar os resultados da dispersão aérea, oferecendo uma abordagem que combina a eficiência da cobertura aérea com a precisão do plantio, em detrimento das técnicas tradicionais.

O estudo conduzido por Francislene Angelotti (2012) analisa o impacto da temperatura na patologia de sementes nativas da Caatinga, com foco na detecção de fungos associados a essas sementes. A presença de fungos pode reduzir o poder germinativo das sementes, causar a morte de plântulas e transmitir doenças para plantas adultas. A temperatura é um fator ambiental crucial que influencia tanto o desenvolvimento das sementes quanto dos patógenos. Temperaturas variáveis durante a germinação das sementes afetam diretamente o desenvolvimento de patógenos, com temperaturas mais altas ou baixas influenciando a taxa de crescimento e a extensão da infecção dos fungos. Estudos recentes indicam que a temperatura apresenta um papel significativo na incidência de fungos fitopatogênicos em sementes de espécies como Angico, Aroeira e Pereira, demonstrando diferenças na ocorrência de fungos

dependendo da temperatura (ANGELOTTI, 2012).

Os resultados obtidos, apesar de uma aparente baixa taxa de germinação, demonstram alinhamento com trabalhos realizados anteriormente em diversas condições e biomas. O último experimento descrito, ainda em andamento, mostra que em condições ideais é possível elevar a taxa de germinação à patamares ótimos, ou seja, os máximos alcançáveis dadas as condições ambientais.

Para que uma iniciativa de regeneração da cobertura vegetal venha a vislumbrar o sucesso, visto que as intervenções são mínimas, estratégias de plantio devem ser planejadas: observando-se o comportamento climático local para escolha do período mais propício ao plantio; conhecendo-se as características das espécies eleitas, bem como seu desempenho no que diz respeito à germinação e estabelecimento, para o computo da quantidade de sementes a serem dispersas.

Ainda assim, como visto, as taxas de germinação e sobrevivência ficam aquém dos métodos mais tradicionais como o plantio manual de mudas ou plantio mecanizado. Esse fator não inviabiliza a aplicação da semeadura aérea, assim como o método aqui discutido não tem a pretensão de substituir os demais, mas sim, vir a ser uma alternativa dentre as possibilidades de aplicação em projetos de restauração florestal na Caatinga.

Análise de custos

Ao se executar uma análise de custos estimados para o reflorestamento utilizando o sistema de semeadura aérea por foguetes hidropneumáticos (Apêndice III) observou-se algumas vantagens de cunho econômico quando comparada com as metodologias tradicionais de reflorestamento.

É possível destacar que o custo de operação por hectare diminui à medida que a área de operação aumenta. Após a estimativa de custos fixos e operacionais, três cenários distintos a serem reflorestados foram criados, cada um com uma área diferente, dimensionada em hectares. Nesta simulação, não se verificou variações locais de preço, para tanto foi utilizado uma estimativa de preços médios praticados pelo mercado no ano de 2024, através de pesquisa sumária.

Os custos fixos dizem respeito aos materiais e equipamentos necessários a semeadura a serem utilizados por cada equipe de trabalho. Tais materiais e equipamentos incluem os foguetes, sistema de pressurização, sistema de dispersão de sementes, equipamentos de controle e lançamento, e o desenvolvimento de software necessário à automação do sistema e controle de semeadura. Já os custos operacionais são compostos pela mão-de-obra, aluguel e

deslocamento.

No Cenário 1, que envolve a operação de recuperação de 100 hectares com uma única equipe de 2 pessoas, a duração estimada da operação foi de 25 dias. Os custos fixos somam R\$ 15.076,00. Os custos operacionais totalizam R\$ 22.187,50. Além disso, os custos de sementes e peletização são de R\$ 30.000,00. Assim, o custo total da operação é de R\$ 67.263,50, resultando em um custo por hectare de R\$ 672,64.

No Cenário 2, a operação de 1000 hectares é realizada por quatro equipes, com um tempo estimado de 63 dias. Os custos fixos para este cenário são de R\$ 33.304,00, enquanto os custos operacionais chegam a R\$ 185.250,00. Os custos de sementes e peletização foram de R\$ 300.000,00. O custo total para este cenário é de R\$ 518.554,00, resultando em um custo por hectare de R\$ 518,56.

O Cenário 3, que abrange a operação de 10.000 hectares com 40 equipes, também exigiu 63 dias de operação, devido à maior capacidade de trabalho. Os custos fixos neste cenário totalizaram R\$ 252.040,00. Os custos operacionais somaram R\$ 1.744.500,00, enquanto os custos de sementes e peletização foram de R\$ 3.000.000,00. O custo total da operação neste cenário é de R\$ 4.996.540,00, resultando em um custo por hectare de R\$ 499,66.

A partir disso, calculou-se um custo médio estimado de investimento utilizando-se o sistema aqui proposto para recuperação áreas degradadas, resultando num total de R\$ 563,62 por hectare.

Esses resultados demonstram o efeito de economia de escala, onde o custo por hectare diminui com o aumento da área total a ser reflorestada. Isso se dá pelo fato de os custos fixos serem diluídos sobre uma área maior, reduzindo o custo unitário por hectare. Os custos variáveis, como mão-de-obra, deslocamento, sementes e peletização que acabam por avolumar o montante, como esperado. Esta análise destaca tanto a viabilidade econômica, como a eficiência do sistema de semeadura aérea por foguetes hidropneumáticos, especialmente em grandes operações de reflorestamento. Eficiência, essa, percebida pelo tempo necessário à execução de projetos de recuperação.

O estudo de Summers et al. (2015) apresenta custos de reflorestamento que variam de US\$ 1763/ha a US\$ 6396/ha para plantações que visam o estoque de carbono e de US\$ 1703/ha a US\$ 9097/ha para plantações que visam a recuperação ambiental, utilizando métodos como plantio manual de mudas, plantio mecânico de mudas e semeadura direta. Em comparação, o custo médio por hectare utilizando o sistema de lançamento de foguetes é de R\$ 563,62 (aproximadamente US\$ 105), significativamente menor, especialmente quando comparado ao plantio manual e mecânico de mudas. A semeadura direta, embora menos onerosa no estudo de

Summers (2015), ainda demanda mais investimentos do que a abordagem aqui demonstrada. Isso, sem verificar, ainda, o tempo necessário para execução do projeto de reflorestamento.

De forma sistêmica e exemplificativa pode-se elencar, aqui, os estudos destacados no referencial teórico, extraíndo os principais resultados a título de custos de reflorestamento.

Fargione et al. (2021) investigaram os custos de reflorestamento nos EUA, com variações regionais de custo: US\$ 788/ha no sul, US\$ 1.058/ha no oeste e US\$ 2.098/ha no leste. Brancalion et al. (2019) destacam que os métodos de plantio de mudas e semeadura direta são os mais caros, com custos médios de US\$ 2000/ha, enquanto a regeneração natural, com custo médio de US\$ 1000/ha, é significativamente mais barata. Silva (2021) aborda os custos de um sistema agroflorestal silvipastoril, com um custo inicial de R\$ 28.591,90/ha. Plaster et al. (2008) investigaram os custos de reflorestamento em uma APP, com custo total de R\$ 2.177,13/ha. Aquino et al. (2022) avaliam os custos de recomposição de vegetação, com um custo de R\$ 15.270,70/ha.

Por fim, para uma análise mais generalista e atual, pode-se trazer um levantamento realizado pela Fundação Getúlio Vargas (FGV) sobre os custos médios de reflorestamento no ano de 2023 no Brasil. Segundo a fundação, o custo de recuperação de áreas degradadas no Brasil varia conforme o bioma e o nível de degradação. Para áreas de pastagem moderadamente degradadas, os custos médios por hectare variam entre R\$ 979,42 e R\$ 1.541,37. Já para pastagens severamente degradadas, os custos variam entre R\$ 1.563,31 e R\$ 2.100,71 por hectare. Estes valores refletem a necessidade de diferentes níveis de intervenção, como o uso de fertilizantes e implementos, dependendo do grau de degradação da área (FGV, 2023).

A análise de custos do sistema de lançamento de foguetes para dispersão aérea de sementes demonstra uma alternativa significativamente mais econômica em comparação com métodos tradicionais de reflorestamento. Os custos por hectare podem ser substancialmente menores, tornando-se uma opção viável para projetos de qualquer escala, oferecendo uma solução flexível e efetivamente de baixo custo.

CONCLUSÃO

O estudo e a implementação de técnicas de reflorestamento na Caatinga e em terras secas são fundamentais para a recuperação ambiental dessas áreas, que são frequentemente degradadas por atividades humanas e mudanças climáticas. Na Caatinga, os estudos destacam a importância da escolha das espécies nativas, do uso de recipientes adequados para a produção de mudas e das técnicas de plantio que envolvem adubação e proteção das mudas. As pesquisas também indicam que a introdução de espécies nativas pode melhorar significativamente a cobertura vegetal do solo e a diversidade da biomassa forrageira, contribuindo para a recuperação ambiental.

Em terras secas, os estudos demonstram a eficácia de diversas técnicas, como a integração de árvores em sistemas agrícolas, o uso de eco tecnologias, e a adoção de práticas de manejo adaptativo. A semeadura direta, apesar de seus desafios, surge como uma técnica promissora para a restauração em larga escala, especialmente quando combinada com outras práticas de plantio e manejo de sementes. Além disso, as novas tecnologias, como o uso de *drones*, apresentam potencial significativo para otimizar os esforços de restauração em áreas remotas e de difícil acesso.

Portanto, o sucesso dos projetos de reflorestamento depende da combinação de múltiplas abordagens e tecnologias adaptadas às condições locais, da participação comunitária, e da criação de políticas públicas que suportem iniciativas de restauração em larga escala. O monitoramento contínuo e adaptativo das ações de restauração é fundamental para assegurar o sucesso a longo prazo e promover a resiliência ecológica e a sustentabilidade dos ecossistemas restaurados.

Os resultados obtidos, apesar de uma aparente baixa taxa de germinação, demonstram quatro situações de interesse. A primeira é que o sistema de peletização, mesmo que muito incipiente, se mostra promissor, isto, pois, comparando a taxa de germinação das sementes peletizadas com a taxa de germinação das sementes *in natura*, percebeu-se uma vantagem extremamente interessante e relevante. Tal fato leva ao estímulo de uma procura pela melhoria do método, buscando-se melhorar a taxa de germinação. Os experimentos podem ser orientados, como já mencionado, trabalhando-se melhor a quebra da dormência. Outros vieses se dão na otimização do armazenamento do embrião, buscando novos materiais a fim de prolongar a reserva hídrica e minimizar a variação térmica, e, eventualmente, inclusão de aditivos como hormônios vegetais para estimular com maior rapidez o crescimento radicular e foliar dos embriões encapsulados.

A segunda perspectiva de interesse reside na escolha das espécies. É nítida a diferença

de resposta entre o pinhão bravo (*Jatropha mollissima*) e as demais espécies eleitas para os experimentos. Em virtude do baixo volume de pesquisas com essa perspectiva no que diz respeito às espécies da Caatinga, se conjectura a manutenção dos experimentos com germinação com várias outras espécies tidas como pioneiras, sobretudo as leguminosas, pelo seu papel de condicionamento de solo. Nesse aspecto se vislumbra a possibilidade de pesquisa no sentido de indução de embriogênese somática do pinhão bravo, no intuito de se produzir sementes sintéticas destinadas ao plantio direto, visando a recuperação de áreas degradadas.

A terceira observação é feita sobre a relação ecológica dos resíduos deixados pelas sementes não germinadas, que por não serem estranhas ao bioma, acabam tornando-se eventuais recursos para o ambiente. O mesmo pode ser dito dos componentes utilizados na peletização, rapidamente são absorvidos pelo solo, convertendo-se em materiais disponíveis ao reuso nos processos ecológicos.

A quarta situação diz respeito ao fator econômico, mesmo se tratando de uma pesquisa pioneira, em fase embrionária, e com taxas de germinação relativamente tímidas, nesse estado da arte já se mostra viável uma aplicação em larga escala para uma primeira abordagem no processo de sucessão ecológica em função dos custos envolvidos na operação.

Dessa feita, preza-se pela continuidade dos estudos com foco na melhoria das técnicas de encapsulamento para as condições específicas da Caatinga, integrando o uso de novas tecnologias para otimizar os processos de recuperação. Essa abordagem integrada tem capacidade de aumentar significativamente as taxas de sucesso e a sustentabilidade dos projetos de revegetação em áreas degradadas.

REFERÊNCIAS

- ALBRECHT, C.; CONTRERAS, Z.; WAHL, K.; STERNBERG, M.; CHRISTOFFERSEN, B. Winners and losers in dryland reforestation: species survival, growth, and recruitment along a 33-year planting chronosequence. **Restoration Ecology**, v. 30, n. 4, p. e13559, 2021. DOI: 10.1111/rec.13559.
- ANGELOTTI, Francislene. Impacto da temperatura em patologia de sementes nativas da Caatinga. **Informativo Abrates**, v. 22, n. 3, 2012.
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353-1367, 2018.
- AQUINO, F. de G.; OLIVEIRA, M. C.; GONÇALVES, H. M.; VILELA, M. F.; SOUSA-SILVA, J. C. Análise de custos na recomposição em área de preservação permanente no Distrito Federal. Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, 2022.
- ARAÚJO FILHO, J. A. Desenvolvimento sustentável da caatinga. Sobral (CE): Ministério da Agricultura/EMBRAPA/CNPC, 1996. 45p.
- ARAÚJO, F. S.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V.; MARTINS, F. R. Repartição da flora lenhosa no domínio da Caatinga. In: ARAÚJO, F. S.; RODAL, M. J. N.; BARBOSA, M. R. V. (orgs.). **Análise das variações da biodiversidade do Bioma Caatinga: suporte a estratégias regionais de conservação**. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente, 2005. p. 15-33.
- BACHA, C. J. C. The evolution of reforestation in Brazil. *Oxford Development Studies*, v. 34, n. 2, p. 243-263, 2006.
- BARRIO, P.; PEROTTI, et al. Theoretical and Experimental Analysis of the Physics of Water Rockets. **European Journal of Physics**, n. 31, 2010.
- BITENCOURT, F. de; ZOCHE, J. J.; COSTA, S.; SOUZA, P. Z. de; MENDES, A. R. Nucleação por *Mimosa bimucronata* (DC.) O. Kuntze em áreas degradadas pela mineração de carvão. *Revista Brasileira de Biociências*, Porto Alegre, v. 5, supl. 1, p. 750-752, 2007.
- BRANCALION, P. H. S. et al. The cost of restoring carbon stocks in Brazil's Atlantic Forest. *Land Degradation & Development*, v. 32, n. 2, p. 830-841, 2021.
- BRANCALION, P. H. S. et al. What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. *Biological Conservation*, v. 240, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108274>.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- _____. Decreto nº 3.420, de 20 de abril de 2000. Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Florestas - PNF, e dá outras providências. Portal Eletrônico. S.d. Brasília: disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d3420.htm#:~:text=DECRETO%20No%203.420%2C%20DE,que%20lhe%20confere%20o%20art.>. Acesso em janeiro de 2021.

_____. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Portal Eletrônico. S.d. Brasília: disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em janeiro de 2021.

_____. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa e dá outras providências. Portal Eletrônico. S.d. Brasília: disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em janeiro de 2021.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Recuperação de áreas degradadas. Portal Eletrônico. S.d. Brasília: disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/plano-anual/item/8705-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1reas-degradadas.html>>. Acesso em janeiro de 2021.

_____. Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca/PAN-Brasil. Brasília (DF): Ministério do Meio Ambiente/Secretaria de Recursos Hídricos, 2004. 214p.

CABRAL, G. A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S. Spatial structure and aboveground biomass in different caatinga succession stages, in Santa Terezinha, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 566-574, 2013.

CCD. **Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação**. Tradução: Delegação de Portugal. Lisboa (PT): Instituto de Promoção Ambiental, 1995. 55p.

COSTA, Thalles Luiz Negreiros da. Desenvolvimento inicial em campo de seis espécies arbóreas da caatinga produzidas em diferentes recipientes. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba, 2020.

CORTINA, J.; AMAT, B.; DERAK, M.; RIBEIRO DA SILVA, M. J.; DISANTE, K. B.; FUENTES, D.; TORMO, J.; TRUBAT, R. On the restoration of degraded drylands. **Sécheresse**, v. 22, n. 2, p. 69-74, 2011. DOI: 10.1684/sec.2011.0301.

DALTRO, R. F.; SILVA, N. M.; VECCHIATO, A. B. Técnicas de nucleação como estratégia de recuperação e valoração ambiental de áreas degradadas situadas no Alto Rio São Lourenço, Campo Verde-MT. **Revista Uniara**, São Paulo, v. 16, n. 2, p. 67-79, 2013.

DUARTE, D. J. Recuperação de área degradada: experiência com implementação do projeto de nucleação. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

EMBRAPA. Nucleação. S.d. disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/nucleacao>>. Acesso em janeiro de 2021.

FARGIONE, J. et al. Challenges to the reforestation pipeline in the United States. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, artigo 629198, 2021.

FERREIRA, J. R.; SILVA, J. O.; MORGADO, M. V.; MACÊDO, J. D. B.; RODRIGUES, P.

M. S. Direct seeding as a recruitment alternative for the threatened tropical palm *Syagrus coronata* (Mart.) Beccari in Brazilian dry forest. **Brazilian Journal of Biology**, vol. 82, e264348, 2022. DOI: 10.1590/1519-6984.264348.

FGV. Custos de recuperação de áreas degradadas na Amazônia brasileira. **Agro FGV**, 2023. Disponível em: <https://portal.fgv.br>. Acesso em: 15 jun. 2024.

FIGUEIREDO, J. M.; ARAÚJO, J. M.; PEREIRA, O. N.; BAKKE, I. A.; BAKKE, O. A. Revegetation of degraded Caatinga sites. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 24, n. 3, p. 332-343, 2012.

FIGUEIREDO, Juliana Matos. Revegetação de áreas antropizadas da caatinga com espécies nativas. 2010. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2010.

FINNEY, Greg. Analysis of a Water-Propelled Rocket: A Problem in Honors Physics. **American Journal of Physics**, 2000.

GARIGLIO, M. A. et al. **Uso Sustentável e Conservação dos Recursos Florestais da Caatinga**. Serviço Florestal Brasileiro, Brasília: MMA, 2010.

GBIF. *Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud. Disponível em: <https://www.gbif.org/species/2952938>. Acesso em: 26 maio 2024.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 6 ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GLOBAL FOREST WATCH. Perdemos um Campo de Futebol de Floresta Tropical Primária a Cada 6 Segundos em 2019. 2020. Disponível em: <https://www.google.com/search?q=da+Global+Forest+Watch%2C+o+Brasil+perdeu+53.8+milh%C3%B5es+de+hectares+de+cobertura+arb%C3%B3rea+entre+2001+e+2018.&oq=da+Global+Forest+Watch%2C+o+Brasil+perdeu+53.8+milh%C3%B5es+de+hectares+de+cobertura+arb%C3%B3rea+entre+2001+e+2018.&aqs=chrome..69i57.426j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>. Acesso em janeiro de 2021.

GONÇALVES, Maria da Penha Moreira. Técnicas de recuperação florestal em áreas perturbadas na Caatinga, Ceará. 2017. 170 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Recife, 2017.

HARPER, Richard J.; SOCHACKI, Stanley J.; McGRATH, John F. The development of reforestation options for dryland farmland in south-western Australia: a review. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 185-196, 2017. DOI: 10.2989/20702620.2016.1255417.

JARRAR, Heba; EL-KEBLAWY, Ali; GHENAI, Chaouki; ABHILASH, P.C.; BUNDELA, Amit Kumar; ABIDEEN, Zainul; SHETEIWY, Mohamed S. Seed enhancement technologies for sustainable dryland restoration: coating and scarification. **Science of the Total Environment**, v. 904, p. 166150, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166150.

KRIBECHE, Haroun; BAUTISTA, Santiago; CHIRINO, Esteban; VILAGROSA, Alberto; VALLEJO, V. Ramón. Effects of landscape spatial heterogeneity on dryland restoration

success: The combined role of site conditions and reforestation techniques in southeastern Spain. **Ecologia Mediterranea**, v. 38, n. 1, p. 5-17, 2012. DOI: 10.3406/ecmed.2012.9325.

LEAL FILHO, N.; SANTOS, G. R.; FERREIRA, R. L. Comparando técnicas de nucleação utilizadas na restauração de áreas degradadas na Amazônia Brasileira. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 587-597, 2013.

LEMOS, C. M. G.; FERREIRA, G. C. Utilização de técnicas de nucleação para recuperação de áreas degradadas pela extração de argila vermelha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 58., 2014, Bento Gonçalves. Anais [...]. Rio Claro: Unesp, 2014. p. 959-967.

LIMA, M. M. de; SANTOS, L. de A.; NOGUEIRA, E. M. de S.; MOURA, F. de B. P. Sobrevivência inicial de seis espécies usadas na recuperação de uma área degradada na Caatinga. **Revista Ouricuri**, Paulo Afonso, Bahia, v. 5, n. 2, p. 132-137, jul./ago. 2015. Disponível em: <<http://www.revistaouricuri.uneb.br>>. Acesso em: 16 maio 2024.

LORENZI, H. **Brazilian trees**. Volume 3. Brazil: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2009.

LUNGUINHO, R. L. Nos caminhos dos relevos residuais: contribuição à ec hidrologia de encostas no semiárido brasileiro. 2018. 267f. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2. ed. Fortaleza, CE: Printcolor Gráfica e Editora, 2012.

MAPBIOMAS. Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil. Mapas de uso da terra. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em novembro de 2021.

_____. Relatório anual do desmatamento no Brasil 2020. Disponível em: <<https://alerta.mapbiomas.org/relatorio>>. Acesso em novembro de 2021.

MARTINS, E. J. S.; PIRES, G. D.; SOARES, P. F. C.; SILVA, M. S. Recuperação de áreas degradadas através de nucleação no Parque Natural Municipal de Nova Iguaçu/RJ e sua área de amortecimento. *Revista Engenharia, Meio Ambiente e Inovação*, Nova Iguaçu, v. 7, n. 2, p. 29-46, 2021.

MARTINS, S. V.; MIRANDA NETO, A.; RIBEIRO, T. M. Uma abordagem sobre a diversidade de técnicas de restauração ecológica. In: MARTINS, S. V. (Org.). **Restauração ecológica de ecossistemas degradados**. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2012. v. 1. 293p.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Monitoramento das Mudanças do Bioma Caatinga: Relatório Técnico**. Brasília: MMA, 2017. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/201/_publicacao/201_pubFileName_201.pdf. Acesso em: 27 maio 2024.

MORANDINI, T. L. C. (2014). Solos Tropicais e Bentonita: Análise Geotécnica de Misturas com Ênfase na Abordagem Coloidal. 2014. 267f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

MORO, M. F.; LUGHADHA, E. N.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A phytogeographical metaanalysis of the Semiardi Caatinga Domain in Brazil. **Bot. Rev.**, v. 82, ed. 2, p. 91-148, 2016.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; FONSECA, G. A. B.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, n. 403, p. 853-859, 2000.

NATIONAL GEOGRAPHIC. The Global Impacts of Habitat Destruction. 2019. Disponível em: <https://blog.nationalgeographic.org/2019/09/25/the-global-impacts-of-habitat-destruction/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

NAVARRO CERRILLO, José; DEL CAMPO, Antonio D.; LÓPEZ, Fernando; AVILÉS, Maria; MATEOS, Enrique. Restoration of degraded ecosystems in the Mediterranean: lessons from experience. **Journal of Environmental Management**, v. 55, n. 1, p. 1-15, 2000. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00600-9.

NEVES, E. L.; FUNCH, L. S.; VIANA, B. F. Comportamento fenológico de três espécies de *Jatropha* (Euphorbiaceae) da caatinga, semi-árido do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 33, p. 155-166, 2010.

NEWTON, Adrian C.; DEL CASTILLO, Rafael F.; ECHEVERRÍA, Cristian; GENELETTI, Davide; GONZÁLEZ-ESPINOSA, Mario; MALIZIA, Lucio R.; PREMOLI, Andrea C.; REY BENAYAS, José M.; SMITH-RAMÍREZ, Cecilia; WILLIAMS-LINERA, Guadalupe. Forest landscape restoration in the drylands of Latin America. **Ecology and Society**, v. 17, n. 1, p. 21, 2012. DOI: 10.5751/ES-04572-170121.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica**. vol. 1. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica**. vol. 2. 4. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

OLIVEIRA FILHO, A. T.; JARENKOV, J. A.; RODAL, M. J. N. Floristic relationships of seasonally dry forests of eastern South America based on tree species distribution pattern. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. **Neotropical savannas and seasonally dry forests**. Boca Raton (EUA): CRC Press, p. 159-190, 2006.

OLIVEIRA, M. B. de; REZENDE, M. Q. Estudos de métodos de recuperação de áreas degradadas. Caderno Saberes, Sete Lagoas, n. 7, 2021. Disponível em: <http://revista.unifemm.edu.br/>. Acesso em: 13 jun. 2024.

PAN Brasil. **Programa de Ação Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca**. Brasília: MMA, 2004.

PELLIZZARO, Keiko Fueta; CORDEIRO, Alba O. O.; ALVES, Monique; MOTTA, Camila P.; REZENDE, Gustavo M.; SILVA, Raissa R. P.; RIBEIRO, José Felipe; SAMPAIO, Alexandre B.; VIEIRA, Daniel L. M.; SCHMIDT, Isabel B. Cerrado restoration by direct seeding: field establishment and initial growth of 75 trees, shrubs and grass species. **Brazilian Journal of Botany**, v. 40, n. 3, p. 681-693, 2017. DOI: 10.1007/s40415-017-0371-6.

PENNINGTON, R. T.; PRADO, D. A.; PENDRY, C. Neotropical seasonally dry forests and Pleistocene vegetation changes. **J. Biogeogr.**, v. 27, p. 261-273, 2000.

PIMENTA JUNIOR, F. Nucleação como precursora na restauração de áreas degradadas e no fornecimento de serviços ambientais em áreas verdes urbanas. 2017. Dissertação (Mestrado em Planejamento Ambiental) – Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2017.

PIÑEIRO, Juan; MAESTRE, Fernando T.; BARTOLOMÉ, Lorenzo; VALDECANTOS, Alejandro. Ecotechnology as a tool for restoring degraded drylands: a meta-analysis of field experiments. **Ecological Engineering**, v. 61, p. 133-144, 2013. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.066.

PLASTER, O. B. et al. Análise dos custos de reflorestamento em área de preservação permanente (APP). 2008. Disponível em: https://www.cnf.org.pe/secretaria_conflat/memorias/DOCUMENTO%20MESAS/MESA%201/Octavios%20Barbosa%20Plaster1.pdf. Acesso em: 13 jun. 2024.

PRADO, D. E. Seasonally dry forests of tropical South America: from forgotten ecosystems to a new phytogeographic unit. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 57, p. 437-461, 2000.

PRESTES, M. L. M. **A pesquisa e a construção de conhecimento científico: do planejamento aos textos, da escola à academia**. 3ed. São Paulo: Rêspel, 2008.

QUEIROZ, M. F. et al. Crescimento e fenologia de espécies de *Jatropha* durante a estação chuvosa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 405-411, 2013.

REIS, A. et al. Nucleação: concepção biocêntrica para a restauração ecológica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 2, p. 509-519, abr.-jun., 2014.

RIBEIRO, E. M. S.; ARROYO-RODRIGUEZ, V.; SANTOS, B. A.; TABARELLI, M.; LEAL, I. R. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. **Journal of Applied Ecology**, 52, p. 611-620, 2015.

ROMANELLI, Alejandro; BOVE, Italo; MADINA, Federico Gonzalez. Air expansion in the water rocket. **American Journal of Physics**, 2012.

ROYAL SOCIETY. What is the human impact on biodiversity?. 2024. Disponível em: <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/biodiversity/>. Acesso em: 16 jun. 2024.

SALES, Francisco das Chagas Vieira. Revegetação de área degradada da caatinga por meio da semeadura ou transplante de mudas de espécies arbóreas em substrato enriquecido com matéria orgânica. 2008. 64f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia – Sistemas Agrossilvipastoris no Semi-Árido) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2008.

SAMPAIO, Alexandre B.; VIEIRA, Daniel L.M.; HOLL, Karen D.; PELLIZZARO, Keiko F.; ALVES, Monique; COUTINHO, André G.; CORDEIRO, Alba; RIBEIRO, José Felipe; SCHMIDT, Isabel B. Lessons on direct seeding to restore Neotropical savanna. **Ecological Engineering**, v. 138, p. 148-154, 2019. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2019.07.025.

SANTOS, Edinalva Alves Vital. Desenvolvimento de métodos de nucleação com mix de

plantas xerófilas para recuperação de áreas em processo de desertificação. Monografia de Conclusão de Curso. Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, Picuí/PB, 2018.

SANTOS, M. J.; MACHADO, I. C.; LOPES, A. V. Biologia reprodutiva de duas espécies de *Jatropha* L. (Euphorbiaceae) em caatinga, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 28, p. 361-373, 2005.

SANTOS, Sérgio Roberto Garcia dos. Peletização de Sementes Florestais no Brasil: Uma Atualização. *Floresta e Ambiente*, v. 23, n. 2, p. 286-294, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.120414>. Acesso em: 14 jun. 2024.

SILVA, Antônio Carlos Silveiro; RONDON NETO, Rubens Marques; RIBEIRO JÚNIOR, Norberto Gomes; VEIGA, Jessica Borges da; CAIONI, Charles; CLAUDINO, Wesley Vicente. Planting of Seedlings and Direct Seeding with Different Inputs in Pioneer Species in the Southeastern Amazon. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 2, e20190084, 2020. DOI: 10.1590/2179-8087.008419.

SILVA, I. A. Avaliação das técnicas de nucleação para restauração ecológica das matas ciliares do Córrego Santo Antônio. 2011. Monografia (Tecnólogo em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia de Jahu, Jaú, 2011.

SILVA, José Evanaldo Rangel da. Estudo da Dispersão de Sementes, Banco de Sementes e Regeneração Natural de Três Espécies Arbóreas da Caatinga. 2010. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, PB, 2010.

SILVA, J. M. C.; LEAL, I. R.; TABARELLI, M. **Caatinga: The Largest Tropical Dry Forest Region in South America**. Springer, 2016.

SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; FONSECA, M. T.; LINS, L. V. (orgs). **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. Brasília (DF): MMA/UFPE/Conservation International – Biodiversitas – Embrapa Semi-árido, 2004. 382p.

SILVA, Luís M. B. da. Estimativa de custos para reflorestamento de áreas de pastagens degradadas no município de Jaru, Estado de Rondônia, Brasil. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC (Especialização em Direito Ambiental) – Escola da Magistratura do Estado de Rondônia, Porto Velho, 2021.

SOCOLÓWSKI, Fábio; VIEIRA, Daniela C. M.; SOUZA, Bruno R.; MELO, Felipe P. L.; RODRIGUES, Renato G. Restoration in Caatinga: a proposal for revegetation methods for the most exclusive and least known ecosystem in Brazil. **Multequina**, v. 30, n. 2, p. 247-263, 2021. DOI: 10.1090/S000-000X(00)00000-0.

SOUZA, A. M. R. de; ALVES, D. F.; FORNEAS, F. G.; SILVA, N. P. Recuperação de áreas degradadas: restauração de áreas degradadas por técnicas de nucleação. Trabalho Interdisciplinar de Graduação. Centro Universitário de Belo Horizonte – UNI-BH, Belo Horizonte, 2013.

SOUZA, B. I.; ARTIGAS, R. F.; LIMA, E. R. V. Caatinga e desertificação. **Mercator**, Fortaleza (CE), v. 14, n. 1, p. 131-150, jan./abr. 2015.

SOUZA, B. I.; SUERTEGARAY, D. M. A.; LIMA, E. R. V. Evolução da desertificação no Cariri paraibano a partir da análise das modificações na vegetação. **Geografia**, Rio Claro (SP), v. 36, n. 1, p. 193-205, jan./abr. 2011.

SOUZA, Danilo Diego de. **Adaptações de plantas da Caatinga**. São Paulo: Oficina de textos. 2020.

SOUZA, Diego Cerveira de; ENGEL, Vera Lex. Advances, challenges, and directions for ecological restoration by direct seeding of trees: Lessons from Brazil. **Biological Conservation**, v. 284, p. 110172, 2023. DOI: 10.1016/j.biocon.2023.110172.

_____. Forest restoration by direct seeding: a global bibliometric analysis. **Restoration Ecology**, v. 30, n. 8, e13631, 2022. DOI: 10.1111/rec.13631.

SOUZA, L. M. de; COSTA, M. de C. Análise do método de nucleação na recuperação de matas ciliares. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Biológicas) – Universidade Sagrado Coração, Bauru, 2010.

SOUZA, Nádson Ricardo Leite de; NASCIMENTO, Maria Edilene da Silva; PEREIRA, Thaís Felipe; BORGES NETO, Inocencio De Oliveira; XAVIER, Rafael Albuquerque. O geoturismo como instrumento de conservação do patrimônio geomorfológico do cariri paraibano: avaliação das potencialidades da fazenda Salambaia. In: MELO, Josandra Araújo Barreto de (org.). **Práticas pedagógicas: experiências de pesquisa e ensino de geografia no estado da Paraíba**. Vol. 2. Campina Grande: EDUEPB, 2023. p. 71-96. Disponível em: <https://eduepb.uepb.edu.br/publicacoes-2023/>. Acesso em: 04 mai. 2024.

STAMATOPOULOS, I.; LE, T. C.; DAVER, F. UAV-assisted seeding and monitoring of reforestation sites: a review. **Australian Forestry**, v. 87, n. 2, p. 123-145, 2024. DOI: 10.1080/00049158.2024.2343516.

SUMMERS, D. M.; BRYAN, B. A.; NOLAN, M.; HOBBS, T. J. The costs of reforestation: A spatial model of the costs of establishing environmental and carbon plantings. **Land Use Policy**, v. 44, p. 110-121, 2015.

TRENTIN, B. E.; ESTEVAN, D. A.; ROSSETTO, E. F. S.; GORENSTEIN, M. R.; BRIZOLA, G. P.; BECHARA, F. C. Restauração florestal na Mata Atlântica: passiva, nucleação e plantio de alta diversidade. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 160-174, 2018.

VASCONCELOS, G. C. L. et al. Caracterização morfológica de *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 9, p. 263-268, 2014.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro (RJ): IBGE, 1991. 124p.

VALLEJO, V. Ramón; SMANIS, Athanasios; CHIRINO, Esteban; FUENTES, David; VALDECANTOS, Alejandro; VILAGROSA, Alberto. Perspectives in dryland restoration: approaches for climate change adaptation. **New Forests**, v. 43, n. 5-6, p. 561-579, 2012. DOI: 10.1007/s11056-012-9325-9.

WWF. A warning sign: where biodiversity loss is happening around the world. 2020.

Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/magazine/issues/summer-2021/articles/a-warning-sign-where-biodiversity-loss-is-happening-around-the-world>. Acesso em: 16 jun. 2024.

APÊNDICE I: Desenvolvimento dos foguetes dispersores

Processo de produção e montagem dos foguetes

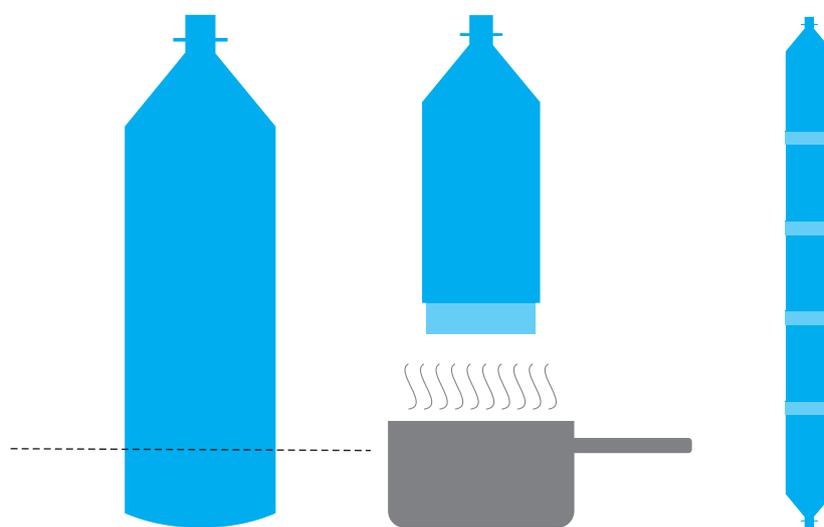
Para o cumprimento do objetivo proposto, foguetes mais complexos do que os lúdicos e simplificados foguetes de garrafa pet, geralmente utilizado em atividades educacionais, precisaram ser desenvolvidos. Em levantamento bibliográfico não se observou qualquer estudo adensado sobre o tema, no máximo alguns projetos escolares em nível conceitual.

Nesse contexto, viu-se a necessidade de proceder com a pesquisa por grupos amadores de modelismo de foguete movidos a água com técnicas de construção mais sofisticadas. A pesquisa acabou por encontrar apenas dois grupos que se dedicam a produzir e divulgar seus resultados com esse tipo de foguete. O mais completo é um grupo sediado em Sydney, Austrália, denominado *Air Command Water Rockets* (<http://www.aircommandrockets.com/>), o segundo é um grupo alemão, denominado *Raketfued Rockets* (<http://www.raketfuedrockets.com/en/index.htm>).

A priori, duas técnicas chamaram a atenção, a colagem de garrafas para aumentar a câmara de ejeção e o reforço estrutural com fibra de vidro de forma a maximizar a pressão suportada.

A etapa de recorte e colagem das garrafas para preparação da câmara de pressão foi ilustrada na Figura 24. Tal etapa consiste em recortar o fundo de duas garrafas PET, de corpo reto e sem textura de superfície, utilizando a parte do corpo e gargalo para as extremidades. Para as peças intermediárias, tanto o fundo, quanto o gargalo são removidos e descartados.

Figura 24: Diagrama de recorte e colagem das garrafas



Fonte: Autor (2022).

Para que haja um encaixe preciso, é necessário encolher uma faixa curta, cerca de 4 cm, do corpo da garrafa e, para tanto, utiliza-se o método de mergulhar essa porção da garrafa em água quente, visto que é uma das propriedades do PET o encolhimento, quando submetido ao calor, visto que se trata de um material termo retrátil. Para que funcione adequadamente a água deve estar em uma temperatura próxima de 70°C e o mergulho deve ter a duração de aproximadamente 5 segundos. Feito isso, testa-se se a garrafa encolheu o suficiente para que encaixe sem folgas na próxima seção que não fora submetida a esse procedimento.

Uma vez que todas as sessões da câmara de pressão se encaixem adequadamente, procede-se lixando as faces externas e internas das seções onde, respectivamente, se encaixarão, utilizando uma lixa seca de grão 320. Feito isso, essas seções de encaixe recebem uma fina camada de resina de poliéster ortoftálica catalisada, a mesma utilizada para laminação com fibra de vidro. Nos testes essa resina apresentou melhores resultados que as colas a base de poliuretano recomendadas pelos grupos amadores citados. Uma vez unidas, as seções são mantidas por 48 horas em um gabarito confeccionado a partir de um perfil em “V” de alumínio de 2 polegadas para que se mantenham retilíneas durante o período de cura.

Uma vez coladas as garrafas, a câmara é instalada em um sistema rotatório pressurizado para verificação de vazamentos (Figura 25) e posterior reforço com um tecido de fibra de vidro com densidade de 220 g/m². Tal sistema conta com uma entrada para conexão com um compressor, uma válvula para fechamento do sistema e desconexão com o compressor e um manômetro de 60 Psi para checagem da pressão.

Figura 25: Garrafas coladas para verificação de vazamento



Fonte: Autor (2020).

É, ainda, montado sobre rolamentos para que se permita o giro da câmara com facilidade. Foram confeccionadas duas peças em latão, com anel de vedação, para o encaixe hermético dos gargalos da câmara. Uma dessas peças é vazada, de modo a pressurizar a câmara e a outra, instalada no lado oposto do sistema, vedada.

Uma vez instalada, a câmara de pressão é submetida ao teste de vazamento, à uma pressão de 25 Psi, por 24 horas, monitorado pelo manômetro. Não ocorrendo qualquer queda de pressão que indique vazamento, o procedimento de reforço é iniciado. O tecido de fibra de vidro é recortado com a mesma largura da câmara e com um comprimento suficiente para que se enrole duas vezes a câmara. Nas extremidades laterais do tecido são recortadas franjas de aproximadamente 4 cm de largura por 10 cm de comprimento para melhor se adaptarem à curvatura das regiões cônicas da câmara.

O procedimento de reforço com o tecido é feito utilizando-se, mais uma vez, resina de poliéster ortoftálica catalisada e um rolo de lã pequeno. Primeiramente efetua-se o lixamento de toda superfície com uma lixa grão 400 e aplica-se uma demão de resina à câmara, mantida pressurizada à 25 Psi, de modo que se mantenha rígida durante a laminação. Em seguida, a medida em que se enrola o tecido na câmara, vai-se adicionando resina e espalhando com o rolo. O período de cura também é de 48 horas. O resultado da laminação e reforço da câmara podem ser observados, também na Figura 26.

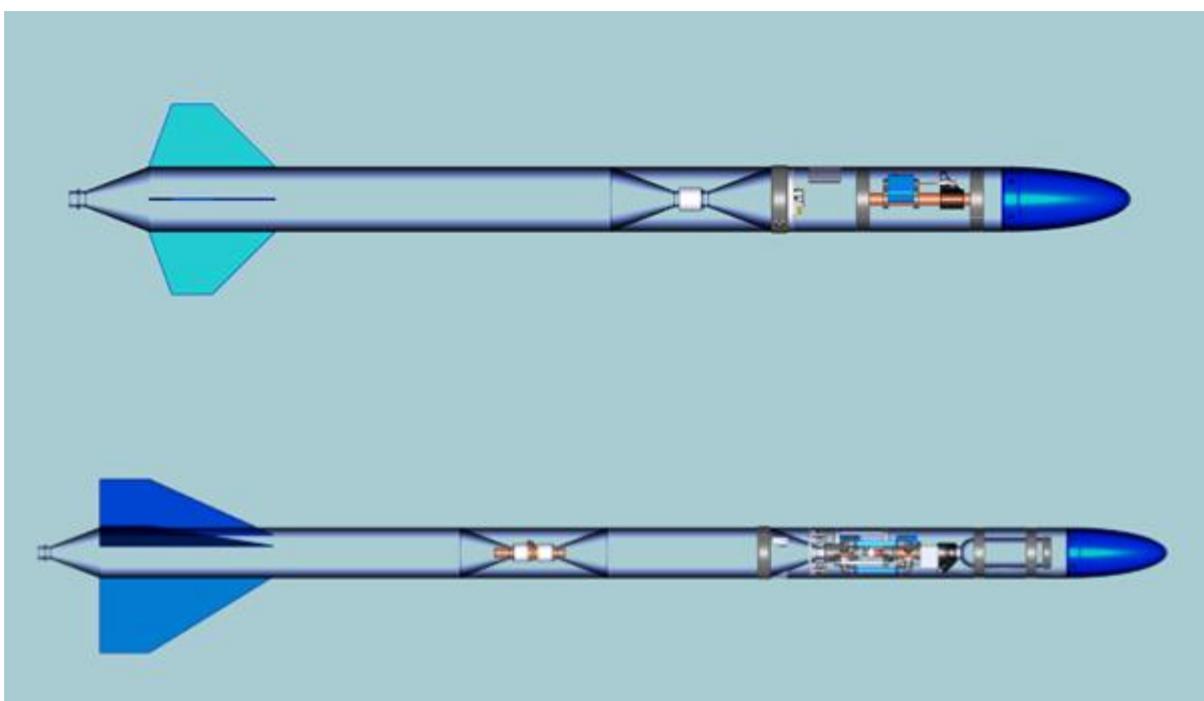
Figura 26: Câmara de pressão no suporte de laminação



Fonte: Autor (2020).

Uma vez dominada a técnica de construção de câmaras, procedeu-se com o projeto mecânico dos demais componentes dos foguetes. Para essa tarefa elegeu-se o *Software VariCAD*. Desenvolveu-se dois projetos, um foguete de testes, sem carga útil, para se verificar a operacionalidade dos sistemas de abastecimento e pressurização, a estabilidade mecânica da câmara de pressurização, a estabilidade aerodinâmica dos foguetes e, também, o sistema de ejeção de paraquedas e recuperação. Na Figura 27 é possível observar o desenho do foguete de testes, acima, e do foguete dispersor, abaixo.

Figura 27: Projetos mecânicos dos foguetes de teste e dispersor

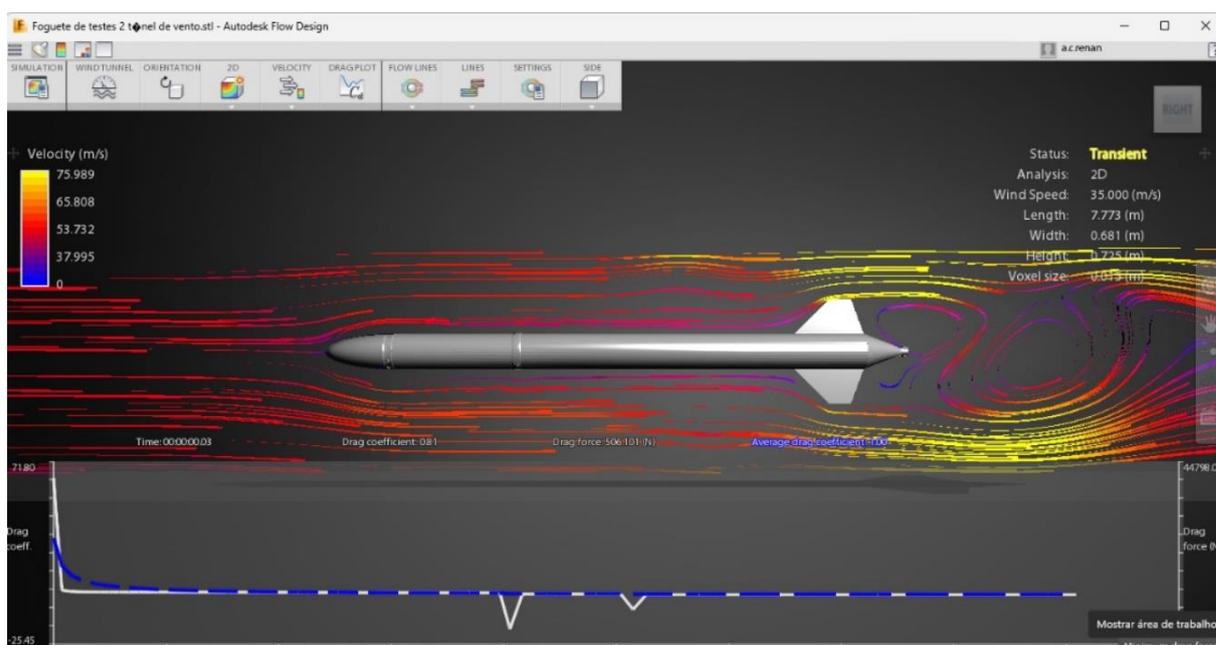


Fonte: Autor (2020).

Os projetos foram submetidos à um túnel de vento virtual, simulado pelo software Autodesk Flow Design, onde se pôde observar as zonas de alta e baixa pressão, atestando a estabilidade de voo, e, também, mensurar o coeficiente de arraste aerodinâmico, necessário para execução acurada dos cálculos de simulação (Figuras 28 e 29).

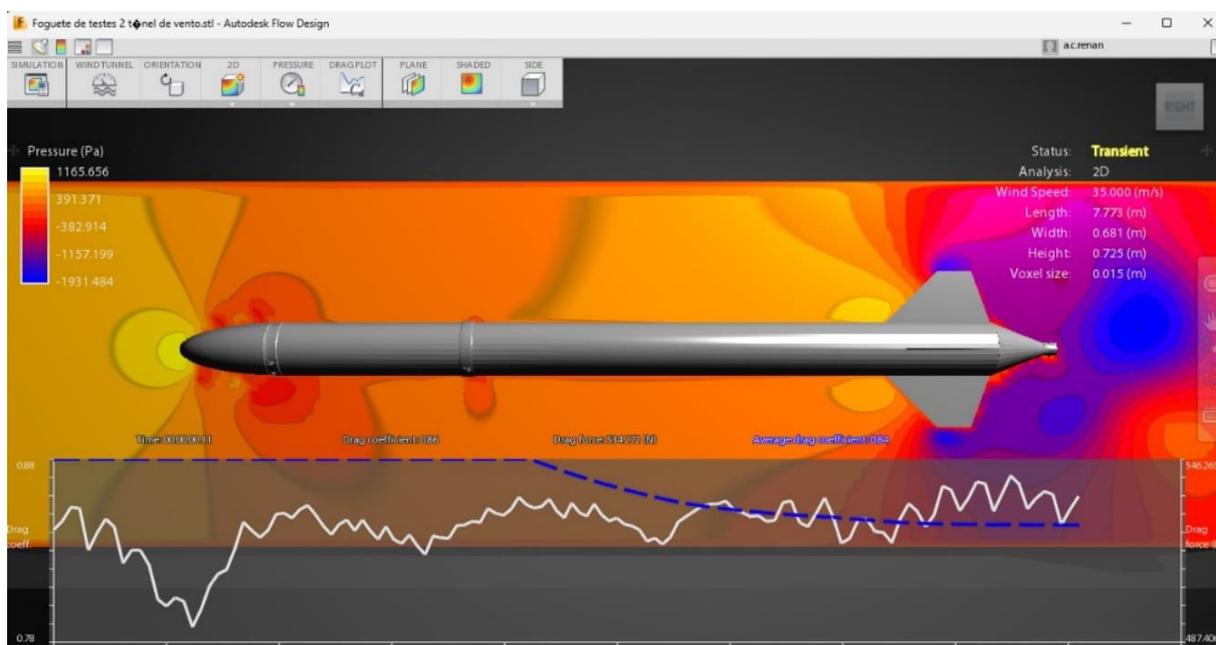
Para as carenagens que conectam a câmara de pressão aos demais módulos do foguete, servindo de estrutura de suporte, uma técnica semelhante à laminação da câmara foi utilizada. Utilizou-se um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro montado em um suporte rotativo como gabarito. O tubo foi previamente envolvido com papel *Kraft* e em seguida procedeu-se com a laminação. Após a cura, o conjunto é removido do tubo para recorte e furação em conformidade com o projeto.

Figura 28: Simulação em túnel de vento: velocidade



Fonte: Autor (2020).

Figura 29: Simulação em túnel de vento: pressão

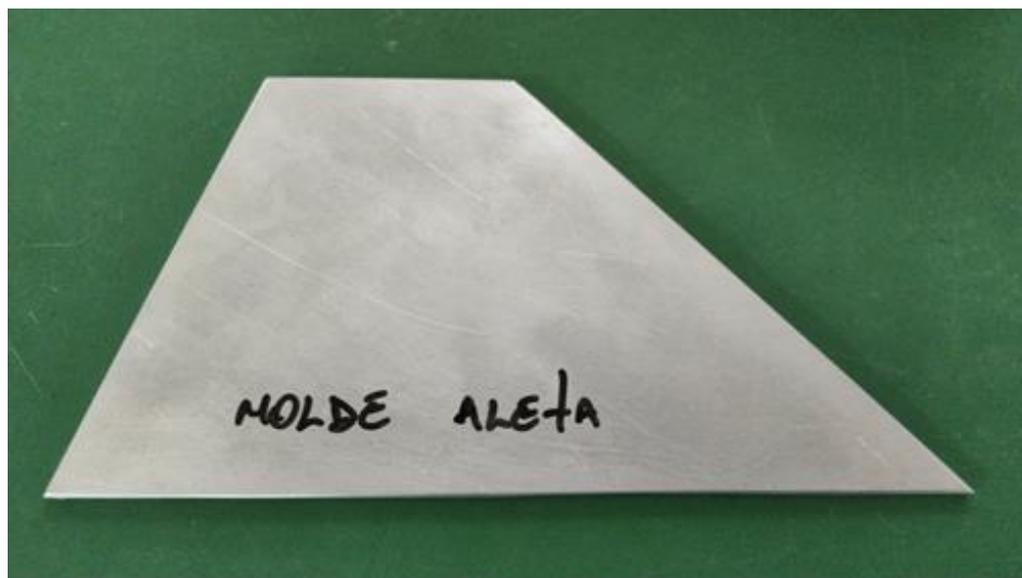


Fonte: Autor (2020).

As peças mecânicas internas, inclusive o bico, ou nariz, de geometria elipsoide circular, foram confeccionadas, majoritariamente, a partir do desenho, com a tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) de impressão 3D em ABS - acrilonitrila butadieno estireno. As aletas foram recortadas com um estilete comum de uma chapa de poliestireno de 2 mm de espessura a partir de um molde confeccionado em alumínio (Figura 30). As arestas foram

lixadas com uma lixa fina de grão 600. A colagem das aletas no corpo do foguete é feita em duas etapas, sendo a primeira com cola epóxi de secagem rápida – 10 minutos – e a segunda, de reforço, com massa plástica a base de resina ortoftálica catalisada, sempre com auxílio de um gabarito.

Figura 30: Molde da aleta em alumínio



Fonte: Autor (2020).

Para que se concretizar uma dispersão controlada de sementes houve a necessidade de embarcar um sistema ativo de dispersão nos foguetes, no lugar de simplesmente despejar as sementes de determinada altura. Com essa finalidade os estudos realizados sobre a dispersão consistiram em desenvolver um dispositivo automático de disparo de dimensões e peso compatíveis com um foguete leve e em analisar a natureza do espalhamento dos projéteis (sementes). Primeiramente optou-se pela análise de espalhamento, com o intuito de antecipar a modelagem e produzir o simulador. Para tanto, foi construído um canhão de ar comprimido simples, a partir de tubos e conexões de PVC e uma válvula de esfera manual – Figura 31. A justificativa para esse modelo se dá pelo conceito de funcionamento que se pretendia empenhar no modelo embarcado: ar comprimido liberado por uma válvula para promover a dispersão das sementes.

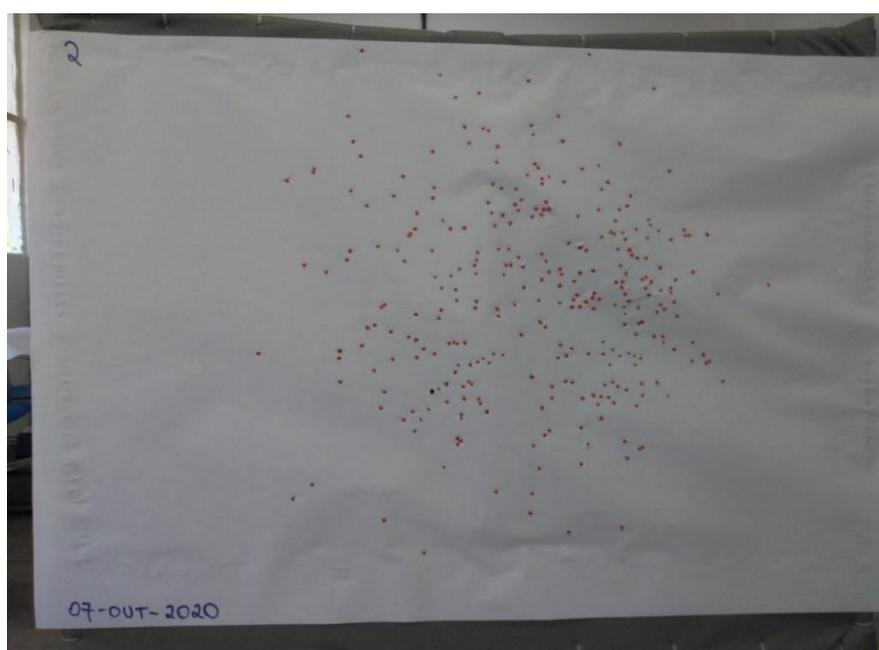
Uma vez pronto, o canhão era pressurizado a 100 Psi e carregado com 50 g de sementes de milho (*Zea mays*) e o disparo era realizado contra um anteparo a uma distância de 4 metros. No anteparo se afixava uma folha de papel de tamanho A2 de modo a se registrar os impactos, manualmente destacados posteriormente com um pincel de lousa branca, para facilitar a verificação da distribuição da dispersão.

Figura 31: Canhão de ar

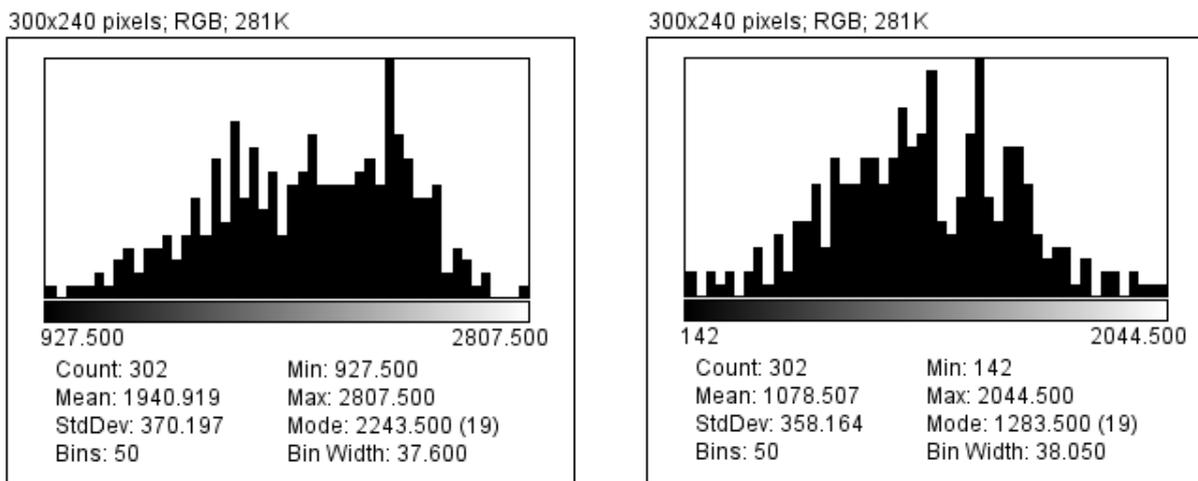
Fonte: Autor (2020).

Foram realizados disparos suficientes, cinquenta ao total, para se concluir que a dispersão obedece à uma distribuição gaussiana. Tal conclusão se pautou no fato de todas as análises convergirem para o mesmo padrão, não havendo qualquer disparo que resultasse em divergência para outro padrão.

Na Figura 32 é possível visualizar as marcas de impressão do disparo no alvo, já destacadas com tinta e, na Figura 33, os histogramas dos eixos horizontal e vertical produzidos a partir da distribuição de frequências dos pontos destacados via análise fotográfica pelo *software ImageJ*.

Figura 32: Padrão de distribuição do disparo

Fonte: Autor (2020).

Figura 33: Distribuição de frequências horizontal e vertical do disparo

Fonte: Autor (2020).

Ainda utilizando o canhão da Figura 31, foi estimada a eficiência do disparo, de modo a se determinar a porcentagem de energia despendida pelo sistema que é aproveitada para impulsionar os projéteis. O método de determinação da energia dissipada, sucintamente, consistiu em se disparar repetidamente, com o canhão de ar, um projétil esférico, sob inclinação e pressão controladas, medir os alcances e comparar o resultado experimental com valor teórico máximo calculado. Em seguida aplica-se a taxa de dissipação em todos os resultados e verifica-se se houve congruência nos resultados experimentais e teóricos. Os resultados apresentaram uma estimativa de que cerca de 1/3 da energia total armazenada pelo ar comprimido é utilizada para impulsionar os projéteis. Com estas informações, pôde-se proceder com a modelagem física do disparo, levando-se em conta as grandezas cinemáticas do foguete influentes no processo.

O desenvolvimento da versão embarcada do canhão teve como inspiração as válvulas de exaustão rápida (da abreviação do inglês: *quick exhaust valve* - QEV) contidas nos mecanismos de disparo de armas de *paintball*. Isso pois, pensou-se originalmente em utilizar uma válvula de esfera acionada por um servomotor, contudo a velocidade angular limitada dos servomotores acabava por não gerar um fluxo instantâneo de ar, em termos pragmáticos, para impulsionar os projéteis, resultando em extrema ineficiência.

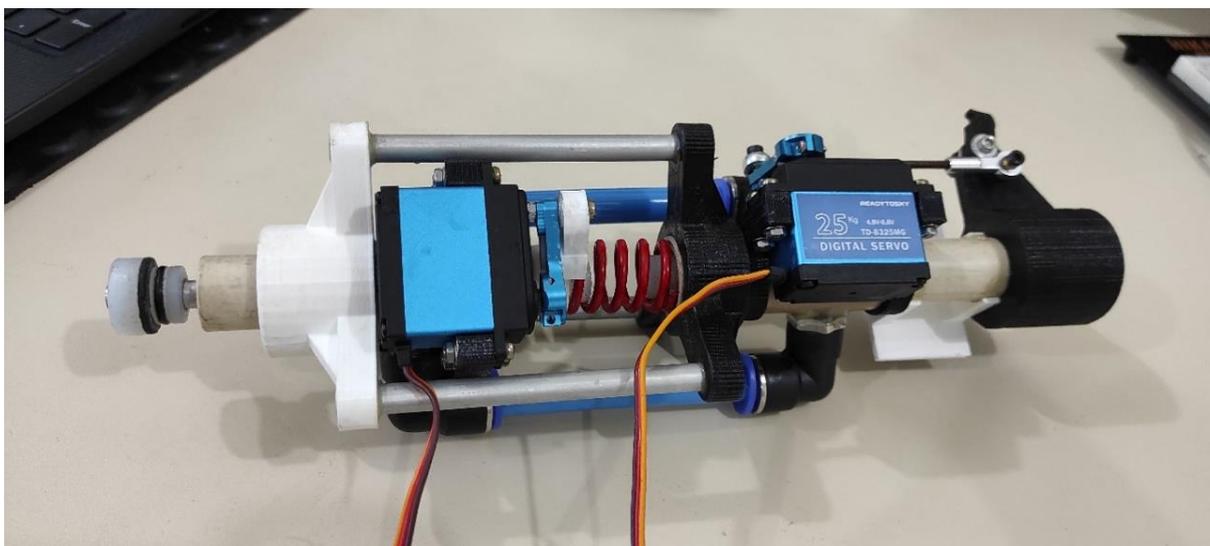
Tais dispositivos, abrem uma escotilha de bloqueio, ancorada por uma mola, quando o gatilho é pressionado, permitindo um fluxo quase que instantâneo do ar comprimido para impulsionar o projétil. Para o foguete, e suas restrições de peso, adaptou-se o sistema observado nos marcadores de *paintball* de modo a ancorar a escotilha com uma trava acionada por um servomotor, visto que, sem essa adaptação, os sistemas eletromecânicos nessas dimensões não

aplicariam a força necessária na escotilha de bloqueio, em formato de êmbolo, para vencer a pressão exercida pelo ar comprimido. Isso permitiu utilizar uma mola como reforço positivo para abrir a válvula, diferentemente do sistema original onde a válvula exerce um reforço negativo. Esse reforço positivo impingido pela mola acabou por tornar o processo ainda mais rápido, conferindo à válvula a eficiência necessária para cumprir a tarefa.

No mesmo dispositivo foi pensado o gatilho de abertura do nariz do foguete e liberação do paraquedas que fica armazenado no seu interior. Isso pois, o disparo para dispersão das sementes se daria pela parte dianteira do foguete, evitando qualquer direção lateral privilegiada no momento do lançamento. Para que essa tarefa fosse executada corretamente a abertura do nariz, ejeção do paraquedas e disparo das sementes precisariam ser eventos muito bem sincronizados. Mais uma vez se fez uso de um servomotor para acionar o mecanismo de abertura do nariz, que se projeta para fora da fuselagem do foguete, segurando uma tira elástica preso à base do nariz.

De forma a tornar mais claro o nariz se prende ao foguete por meio de tiras elásticas, de um lado o elástico é tracionado de um ponto de apoio na carenagem e, no outro, tracionado até o gatilho do mecanismo de abertura, funcionando como uma espécie de estilingue. Assim, quando o gatilho é acionado, o nariz é arremessado e, na mesma ação, ejeta o paraquedas que começa a se desenrolar. Isso feito, o canhão de ar comprimido fica exposto, permitindo o disparo. Tanto o nariz, quanto o paraquedas ficam presos ao foguete pelo lado externo, de modo a não oferecer qualquer empecilho ao disparo. Na Figura 34, pode-se ver a válvula construída.

Figura 34: Válvula de abertura rápida



Fonte: Autor (2020)

De forma a compor o canhão de ar, uma câmara de pressão, de menor volume, confeccionada com o mesmo método descrito para a confecção da câmara de pressão dos foguetes foi utilizada. E para armazenar as sementes, um cartucho foi desenvolvido a partir de uma garrafa PET, de menor volume (500ml) e corpo reto, com o fundo recortado, possibilitando uma rápida troca.

Uma vez montado o canhão com uma mola genérica com dimensão compatível, procedeu-se os testes de disparo. De início percebeu-se o problema: a mola não exercia a força necessária no êmbolo para superar a pressões na câmara superiores a 40 Psi. Desta maneira, a partir das pressões que se pretendia utilizar no canhão (entre 120 e 180 Psi), foi calculada a força mínima necessária que a mola deveria exercer de modo que a válvula funcionasse a contento. Isto posto, procedeu-se com a aquisição das molas, sob encomenda.

Em posse das molas, procedeu-se a inserção na válvula e verificou-se o correto funcionamento, porém não se conhecia os limites de operação. Para tanto, desenvolveu-se um dispositivo para auxiliar na determinação da constante de mola a partir da Lei de Hook. O dispositivo consiste em duas plataformas, uma fixa e outra móvel. A mobilidade é estabilizada por três eixos retificados de 8 mm de diâmetro e rolamentos lineares, de maneira a garantir que a única movimentação se dê na direção de compressão da mola. A plataforma inferior fica apoiada na superfície, imóvel, A plataforma superior foi projetada de modo a acomodar anilhas para verificar a deformação da mola. O dispositivo pode ser verificado na Figura 35.

Figura 35: Dispositivo para medição de constante de mola

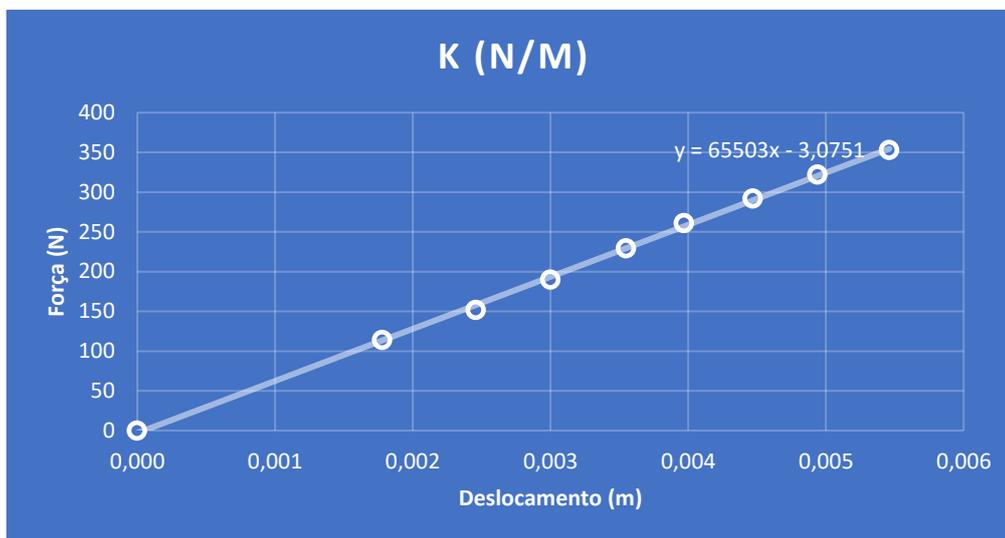


Fonte: Autor (2020).

Para garantir a precisão das medidas utilizou-se um relógio comparador com resolução de $1 \cdot 10^{-5}$ m, ou centésimo de milímetro, acoplado à plataforma móvel do dispositivo. Como

peso foram usadas anilhas com as massas previamente aferidas com uma balança digital com resolução de $1 \cdot 10^{-4}$ kg, ou 0,1 grama. O gráfico contendo os dados utilizados na medição podem ser observados na Figura 36.

Figura 36: Gráfico da força vs. deslocamento da mola



Fonte: Autor (2020).

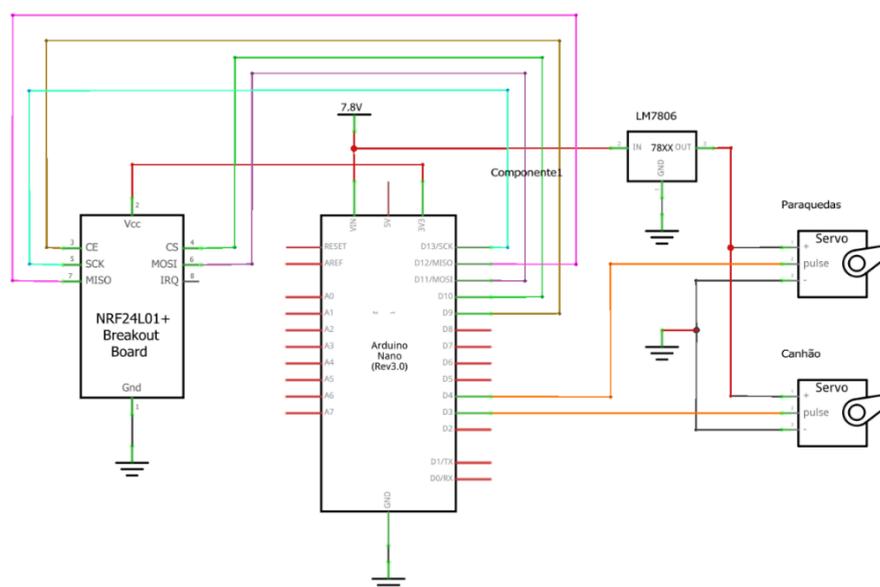
No gráfico da Figura 36 é possível ver o ajuste de curva, realizado pelo método dos mínimos quadrados e a equação da reta resultante do procedimento. Nessa equação, o coeficiente angular representa, justamente, a grandeza procurada que é a constante de mola. Neste caso, a mola possui uma constante de 65.503 N/m ($66,79 \text{ kgf/cm}$), o que confere à válvula uma capacidade de correta operação para pressões de até 300 Psi aplicadas na câmara de ar comprimido do canhão.

O dispositivo de recuperação é um paraquedas simples, obtido por um recorte octogonal em tecido “Faillet” com 1,35 m, medido entre duas arestas opostas, amarrado com cordas finas (5 mm de diâmetro) com 1,5 m de comprimento em cada vértice através de ilhós. Para compor o sistema de recuperação, um fio fino de nylon é preso à tubeira, de forma que após a dispersão das sementes e completa abertura do paraquedas o foguete pode ser rebocado por um molinete e aterrissar próximo ao local de lançamento, sem danos à sua estrutura.

Para a confecção do computador de bordo foi utilizada a plataforma *Arduino Nano*, que possui um microcontrolador *ATmega328*, suficiente para a rotina pretendida, associado a um módulo de radiofrequência *NRF24L01*, que opera em uma frequência de 2,4 MHz e dois servomotores como mecanismos de ação, um para abertura do nariz e ejeção do paraquedas e o outro para o acionamento da válvula de abertura rápida, responsável pela dispersão da carga

útil (sementes). O diagrama elétrico do computador de bordo do foguete pode ser visualizado na Figura 37.

Figura 37: Diagrama elétrico do computador de bordo



Fonte: Autor (2023).

O dispositivo originalmente contava com um giroscópio eletrônico, semelhante aos que se encontram nos smartphones cotidianos, para indicar o momento em que o foguete atingiria o apogeu da trajetória. Por ter um comportamento balístico, o foguete muda de angulação a cada ponto da trajetória. Assim é previsível que no ápice, o foguete esteja em uma inclinação paralela a superfície. Conhecendo esse comportamento a programação para que o sensor indique o momento do apogeu tornar-se-ia trivial, visto que a angulação desejada é de 90° para qualquer dos eixos x ou y , do sensor, que conta com uma orientação canônica.

O problema é que os giroscópios eletrônicos disponíveis no mercado (e financeiramente acessíveis) funcionam tomando como base a aceleração gravitacional, funcionando como um vetor de orientação. Infelizmente a cinemática descrita pelo foguete imprime regimes não inerciais, embaralhando, então, os referenciais adotados por aqueles giroscópios para os cálculos de posição angular.

Como dito, a dinâmica do foguete não permite a utilização de acelerômetros digitais ou quaisquer outros dispositivos que funcionem tendo como base o vetor gravitacional, dados os regimes de aceleração e queda livre da trajetória. Para contornar esse problema e permitir que o canhão dispare no momento adequado, utilizou-se como base para determinar o apogeu da trajetória um temporizador programado a partir da modelagem desenvolvida. O

temporizador é acionado remotamente, sincronizado com o comando utilizado para efetuar o lançamento. Isso conferiu precisão e simplicidade ao computador de bordo.

Com todos os elementos confeccionados, a montagem final é feita no mesmo suporte em “V” anteriormente utilizado como gabarito para a colagem das garrafas. Em seguida é realizado o procedimento de testes de ejeção do paraquedas e disparo do canhão. Pode-se ver o processo de montagem do foguete dispersor, com destaque para válvula de disparo, na Figura 38. Na Figura 39 se observam o foguete de testes montado.

Figura 38: Montagem do foguete dispersor



Fonte: Autor (2021).

Figura 39: Foguetes de teste montado



Fonte: Autor (2021).

Sistema de abastecimento, pressurização e lançamento

A base móvel de lançamento é um sistema composto que possibilita o abastecimento e pressurização do foguete já em posição de lançamento com a quantidade desejada de água, sem necessidade de manipulação ou desmontagem do foguete para abastecimento, assim como o seu posicionamento e lançamento. O projeto mecânico foi efetuado utilizando-se, mais uma vez, o *software VariCAD*.

Foram eleitos materiais resistentes às pressões e forças as quais a base é submetida durante a operação de abastecimento, pressurização e lançamento, tal como às condições ambientais de exposição. As pernas e a trava do gatilho são confeccionadas com tubos de secção quadrada de 2 polegadas em aço inoxidável liga nº 304, a plataforma superior é feita em alumínio, assim como o tubo que se conecta ao foguete. A vedação é garantida por dois anéis de borracha (*o-rings*) inseridos na base do tubo de conexão. As peças de carenagem, articulações e os pés de apoio foram confeccionadas com tecnologia FDM de impressão 3D em ABS. O sistema foi desenhado de modo a se dobrar em um modo mais compactado, facilitando o transporte.

A trava tem ação através de um cilindro pneumático, regulado por uma válvula solenoide de dupla ação com acionamento remoto para maior segurança de operação. A pressão necessária ao acionamento da trava é fornecida por uma câmara de ar comprimido acondicionada no interior da carenagem da base, independente da câmara de pressão do foguete.

Figura 40: Controle remoto de lançamento



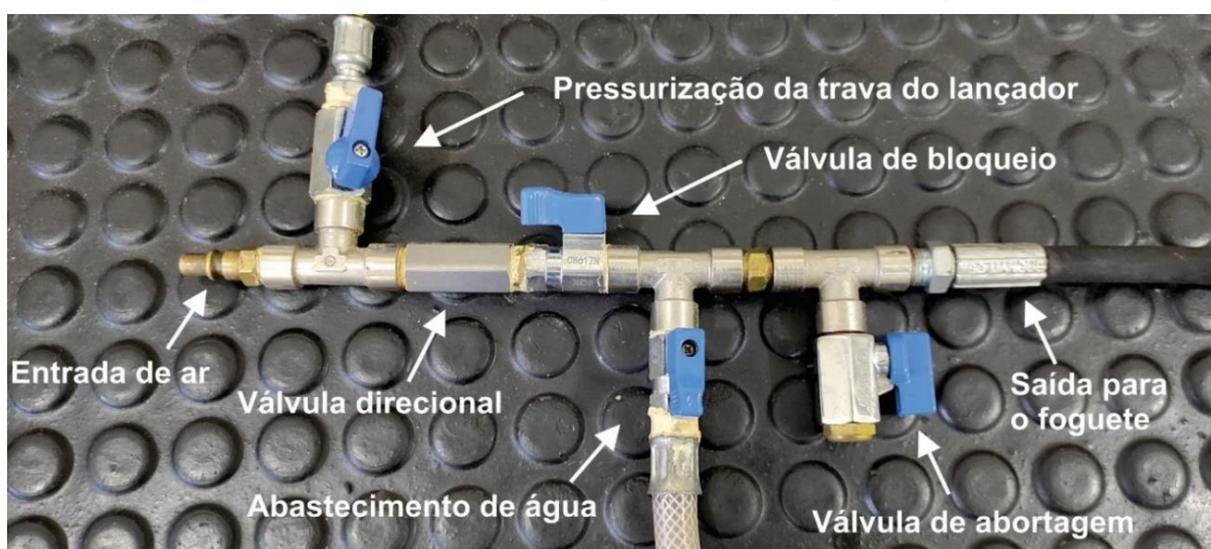
Fonte: Autor (2021).

A base conta com um nível bolha para nivelamento e duas entradas de ar pressurizado, uma inferior para pressurização da câmara responsável pelo acionamento da trava e uma lateral para abastecimento de água e pressurização do foguete. A trava conta com um sistema eletrônico confeccionado a partir da plataforma Arduino Nano (microcontrolador ATmega328), associado a um módulo de radiofrequência NRF24L01 (frequência de 2,4 MHz), acionado por um controle (Figura 40).

O abastecimento e pressurização é realizado com uma bomba manual originalmente destinada à pressurização de carabinas de pressão. Tal escolha se deu por suas características relacionadas à robustez, custo reduzido e por sua capacidade de operar em regime de altas pressões, muito além das pressões utilizadas nos foguetes, conferindo maior teor de segurança à operação.

A bomba é conectada à base por uma mangueira hidráulica de alta pressão e conexões rápidas do tipo *Foster*, acompanhada de um manômetro com escala de média pressão para monitoramento da pressurização do foguete. A bomba de água é conectada à mangueira, contando com uma válvula de esfera e uma válvula de retenção para isolamento do sistema após o abastecimento. Para garantir a integridade do manômetro e da bomba, uma válvula de não retorno unidirecional foi instalada antes da entrada da mangueira de água. Por segurança, em cada mangueira de entrada ou saída foi instalado um registro de esfera, de modo a abrir e fechar o circuito, facilitando também a operação de preparação. Além disso, uma válvula destinada a abortar o lançamento foi também instalada. O sistema de válvulas pode ser observado na Figura 41.

Figura 41: Sistema de válvulas para abastecimento e pressurização



Fonte: Autor (2021).

O resultado da construção da base de lançamento é mostrado na Figura 42. Para efeito de constatação, mais de 200 lançamentos foram realizados com esse sistema, sem qualquer problema ou falha apresentado.

Figura 42: Base de lançamento



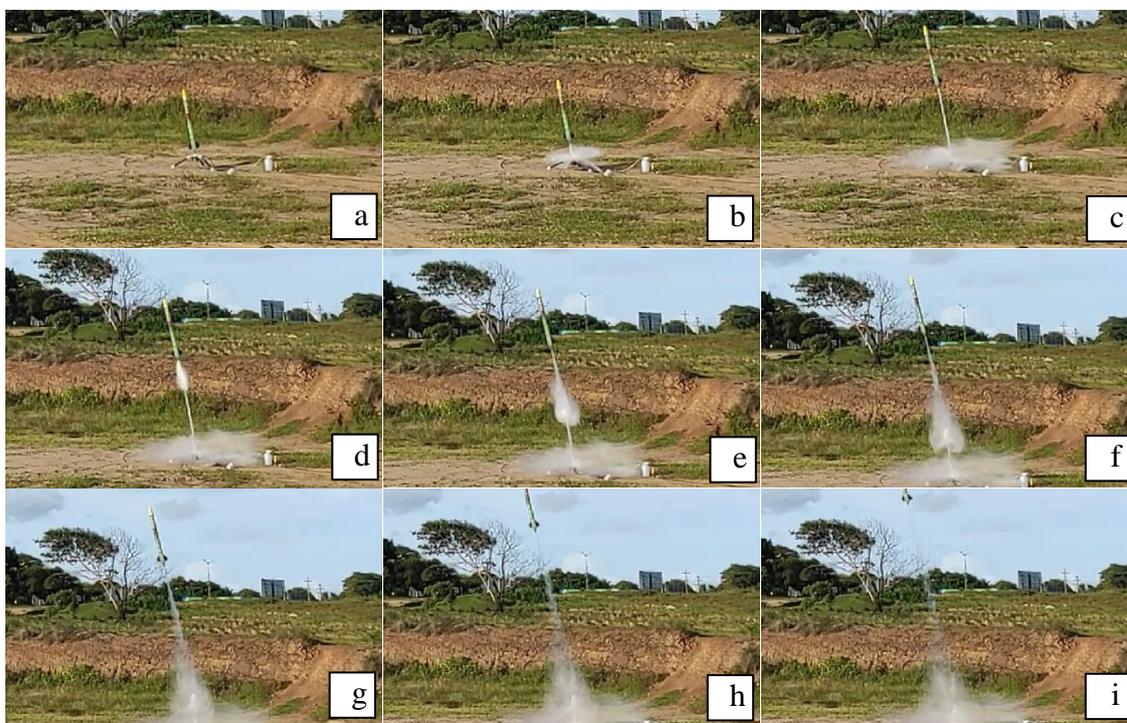
Fonte: Autor (2021).

APÊNDICE II: Modelagem matemática

Propulsão

Observando as imagens extraídas de um dos vídeos feitos dos testes de lançamentos, Figura 43, observou-se que a propulsão deste tipo de foguete ocorre em duas etapas contínuas. Primariamente é ejetada toda a água da câmara pressurizada, mostradas nas três primeiras imagens. Em seguida, é fácil notar a massa de ar pressurizado sendo expelida. Desta feita, convém partir a modelagem deste período acelerado, também, em duas etapas, para que seja o mais fidedigno possível à fenomenologia contida neste processo.

Figura 43: Compêndio de lançamento



Fonte: Autor (2022).

Inicia-se a análise, portanto, pela ejeção de água. Para a descrição desta etapa do movimento do foguete – sistema de massa variável – toma-se a 2ª Lei de Newton com a formulação para a derivada do momento linear:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (1.1)$$

A força resultante, do lado esquerdo da equação, é dada apenas pela força gravitacional, desconsiderando a resistência do ar nesta etapa. Isto se faz pela razão de o movimento acelerado pela propulsão ter uma duração muito pequena, uma fração de segundo,

e o coeficiente de arraste aerodinâmico do foguete ser muito baixo, conforme será demonstrado mais adiante.

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = m \cdot \vec{g} \quad (1.2)$$

$$P = m \cdot v \quad (1.3)$$

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v} + \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot m \quad (1.4)$$

$$\frac{dm}{dt} \cdot \vec{v} + m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{g} \quad (1.5)$$

Para um sistema de massa variável, como é o caso de foguete, a velocidade \vec{v} , que aparece no termo $\frac{dm}{dt} \vec{v}$, é tida como a velocidade de exaustão, passando a ser denominada \vec{v}_e .

$$\frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}_e + m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \vec{g} \quad (1.6)$$

$$m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - \frac{dm}{dt} \cdot \vec{v}_e \quad (1.7)$$

$$m d\vec{v} = -\vec{v}_e dm + m\vec{g} dt \quad (1.8)$$

$$d\vec{v} = -\frac{\vec{v}_e}{m} dm + \vec{g} dt \quad (1.9)$$

É fácil notar que a equação 1.9 é uma equação diferencial de múltiplas variáveis, não sendo possível sua resolução no formato em que se encontra. Para resolver o problema, uma solução interessante é explicitar tanto a velocidade de exaustão, como a massa, como funções de uma mesma variável.

Com base no funcionamento do mecanismo de aceleração destes foguetes, nota-se que ocorre uma expansão gasosa (do ar pressurizado) em um intervalo muito curto de tempo, podendo-se compará-la a uma expansão adiabática sem maiores problemas, visto que o calor específico do ar atmosférico não permite uma troca calórica significativa no intervalo de tempo em que o fenômeno ocorre, cerca de dois décimos de segundo.

Feitas essas considerações e visto que o ar atmosférico quando submetido a estas condições de temperatura e pressão se comporta de forma muito similar ao gás ideal, conforme será demonstrado em análises posteriores, essa aproximação do ar para o gás ideal não trará maiores prejuízos a acurácia da modelagem. Então, a partir das equações de estado para o gás ideal e do teorema da energia cinética é possível determinar uma velocidade máxima possível para ejeção de água da câmara.

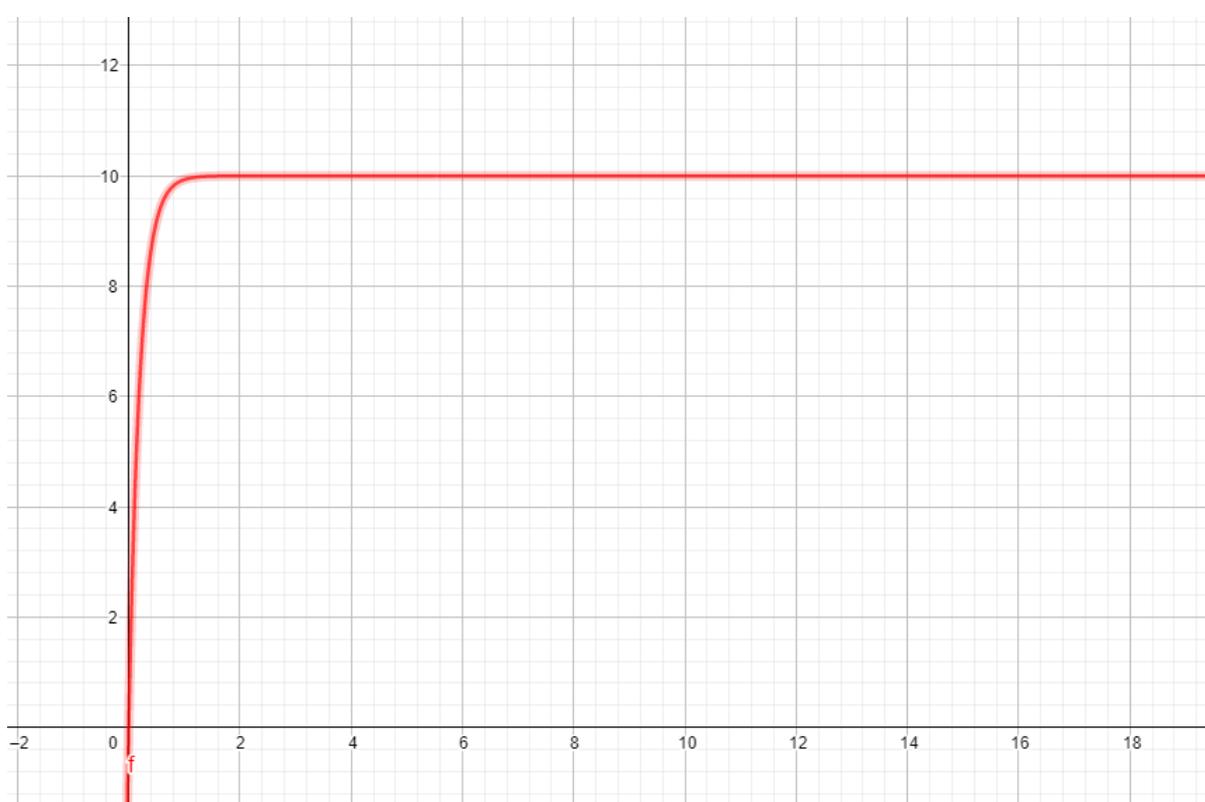
Assumindo que a velocidade de exaustão seja uma função temporal denotada pela equação 1.10 (proposição assumida pelas características de comportamento da função), pode-

se determinar a função de ejeção de massa, também temporal, com base no fluxo de massa.

$$v_e = \omega - \omega e^{-\sigma t} \quad (1.10)$$

Neste caso o termo ω apresentado na equação acima refere-se à uma velocidade assintótica, ou velocidade máxima possível, como discutido. Pode-se ver isto observando-se um gráfico genérico desta função (Figura 44), com valores exemplificativos para ω e σ . A posteriori se demonstrará o ajuste de curva efetuado para estes índices, obtidos empiricamente a partir da análise de vídeo com software Tracker.

Figura 44: Gráfico da Equação 1.10



Fonte: Autor (2022).

Os termos ω e σ contidos na equação 1.10 significam, respectivamente, a assíntota superior da curva, denotada pela velocidade máxima e o índice de suavidade com que a curva se aproxima da assíntota. Na prática, o coeficiente σ implica em quão rapidamente a velocidade cresce para atingir o valor máximo, quanto maior o for o fator sigma, mais íngreme é a taxa de variação de velocidade.

Retomando a resolução da equação 1.9, o fluxo de água do foguete é estabelecido por:

$$\Phi = \frac{dm}{dt} \quad (1.11)$$

Sendo ρ a densidade invariável da água, dada a sua propriedade de

incompressibilidade, a expressão 1.11 passa a ser:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.12)$$

$$m = \rho V \quad (1.13)$$

$$\Phi = \frac{d(\rho V)}{dt} \quad (1.14)$$

Como o volume V é delimitado por um cilindro, quando da ejeção de água:

$$\Phi = \frac{d(\rho A_b h)}{dt} \quad (1.15)$$

$$\Phi = \rho A_b \frac{dh}{dt} \quad (1.16)$$

Desta maneira, assume-se $\frac{dh}{dt} = v_e$.

$$\Phi = -\rho A_b v_e \quad (1.17)$$

Logo:

$$\Phi = -\rho A_b (\omega - \omega e^{-\sigma t}) \quad (1.18)$$

$$\frac{dm}{dt} = -\rho A_b (\omega - \omega e^{-\sigma t}) \quad (1.19)$$

$$dm = -\rho A_b (\omega - \omega e^{-\sigma t}) dt \quad (1.20)$$

Integrando a equação 1.20:

$$\int_{m_0}^m dm' = \int_0^t -\rho A_b (\omega - \omega e^{-\sigma t'}) dt' \quad (1.21)$$

Como $m \leq m_0$:

$$\int_{m_0}^m dm' = - \int_m^{m_0} dm' \quad (1.22)$$

Assim:

$$m - m_0 = -\frac{\rho A_b \omega}{\sigma} (\sigma t + e^{-\sigma t} - 1) \quad (1.23)$$

$$m = m_0 + \frac{\rho A_b \omega}{\sigma} (1 - \sigma t - e^{-\sigma t}) \quad (1.24)$$

A equação 1.24 demonstra a taxa de variação da massa de água pelo foguete em função do tempo, podendo ser mais bem visualizada pelo seu gráfico exibido na Figura 45 com valores exemplificativos para ω e σ .

Substituindo as equações 1.20 e 1.24 na equação 1.9:

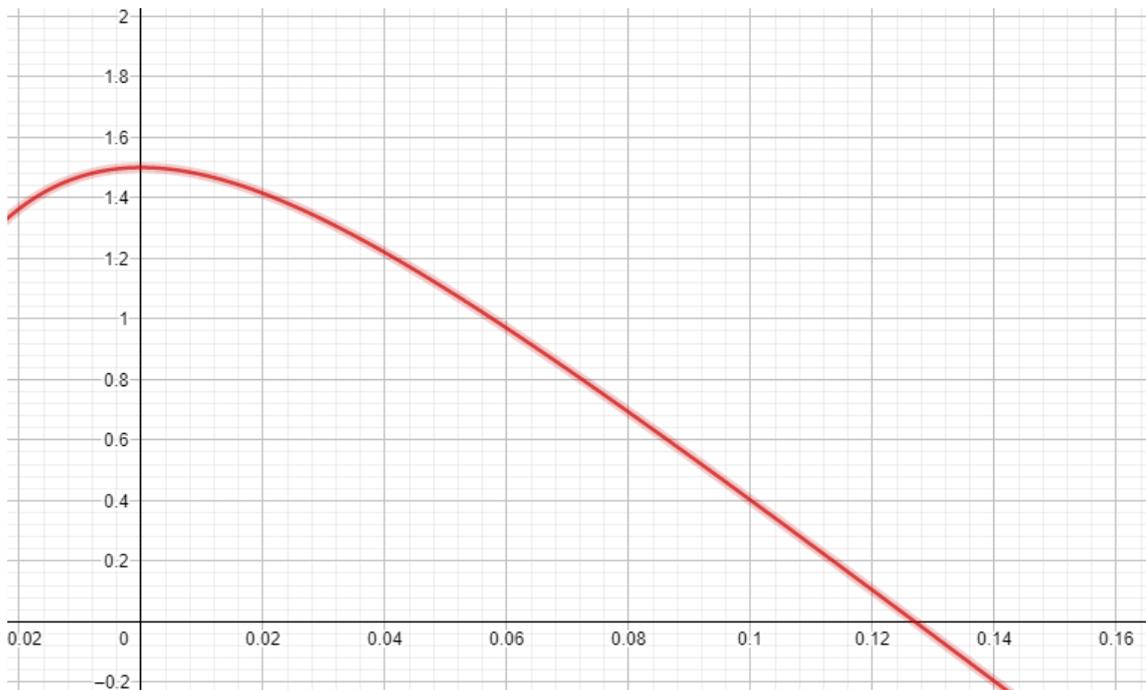
$$d\vec{v} = \frac{(\omega - \omega e^{-\sigma t}) \rho A_b (\omega - \omega e^{-\sigma t})}{m_0 + \frac{\rho A_b \omega}{\sigma} (1 - \sigma t - e^{-\sigma t})} dt + \vec{g}t \quad (1.25)$$

Assumindo $\frac{m_0\sigma}{\rho A_b\omega} + 1 = \lambda$, tem-se:

$$d\vec{v} = \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma t})^2}{\lambda - \sigma t - e^{-\sigma t}} + \vec{g}t \quad (1.26)$$

$$\begin{cases} dv_x = \cos\theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma t})^2}{\lambda - \sigma t - e^{-\sigma t}} dt \\ dv_z = \text{sen}\theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma t})^2}{\lambda - \sigma t - e^{-\sigma t}} dt - gdt \end{cases} \quad (1.27)$$

Figura 45: Gráfico da Equação 1.24



Fonte: Autor (2022).

Como pretendido, chegou-se a uma equação com base apenas em uma variável, contudo, dada a complexidade das equações encontradas, uma solução analítica para as equações diferenciais encontradas torna-se custoso e impraticável. Desta feita é válida a aplicação de método de solução numérica, visto que as equações 1.27 compõem um problema de valor inicial. Neste caso, o método de Runge-Kutta de 3ª ordem – RK3 – é aplicado, eleito pela sua simplicidade e exatidão, exigindo, portanto uma baixa capacidade computacional.

Pelo método de Euler, aproxima-se a taxa de variação instantânea da velocidade para uma taxa de variação média para um intervalo de tempo muito curto, tem-se:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} \approx \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.28)$$

$$a(t) = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v(t + \Delta t) - v(t)}{\Delta t} \quad (1.29)$$

Logo:

$$v(t + \Delta t) = v(t) + a(t)\Delta t \quad (1.30)$$

Com isto, o método RK3 sugere:

$$v_{n+1} = v_n + \frac{\Delta t}{6}(K_1 + 4K_2 + K_3) \quad (1.31)$$

Como dito, as equações 1.27 implicam em um problema de valor inicial. Como está se analisando a aceleração inicial do foguete, sua velocidade de partida é zero, bem como sua posição, assim definida a partir do ponto de lançamento. Desta maneira, as iterações necessárias para se conhecer a posição e velocidade do foguete após o período de ejeção da água podem ser determinadas, limitando-se, contudo, pelo tempo em que o sistema leva para expelir toda a massa de água em conformidade com a equação 1.24.

Os coeficientes K_1 , K_2 , e K_3 , utilizados para descrição do movimento na direção x , são denotados por:

$$K_1 = \cos \theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma t})^2}{\lambda - \sigma t - e^{-\sigma t}} \quad (1.32)$$

$$K_2 = \cos \theta \frac{\sigma\omega \left(1 - e^{-\sigma(t+\frac{\Delta t}{2})}\right)^2}{\lambda - \sigma \left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - e^{-\sigma(t+\frac{\Delta t}{2})}} \quad (1.33)$$

$$K_3 = \cos \theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma(t+\Delta t)})^2}{\lambda - \sigma(t + \Delta t) - e^{-\sigma(t+\Delta t)}} \quad (1.34)$$

E os coeficientes L_1 , L_2 , e L_3 , utilizados para descrição do movimento na direção z , por sua vez, são denotados por:

$$L_1 = \text{sen } \theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma t})^2}{\lambda - \sigma t - e^{-\sigma t}} - g \quad (1.35)$$

$$L_2 = \text{sen } \theta \frac{\sigma\omega \left(1 - e^{-\sigma(t+\frac{\Delta t}{2})}\right)^2}{\lambda - \sigma \left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) - e^{-\sigma(t+\frac{\Delta t}{2})}} - g \quad (1.36)$$

$$L_3 = \text{sen } \theta \frac{\sigma\omega(1 - e^{-\sigma(t+\Delta t)})^2}{\lambda - \sigma(t + \Delta t) - e^{-\sigma(t+\Delta t)}} - g \quad (1.37)$$

Como considerado outrora a assíntota ω da curva de velocidade de exaustão pode ser obtida a partir do teorema da energia cinética.

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \int_{\alpha}^{\beta} \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (1.38)$$

Assumindo a velocidade inicial $v_0 = 0$:

$$\frac{mv^2}{2} = \int_{\alpha}^{\beta} \vec{F} \cdot d\vec{r} \quad (1.39)$$

Neste ponto verifica-se que o trabalho realizado necessário para deslocar a massa de água para fora da câmara de exaustão é o mesmo que o ar pressurizado realiza para expandir.

$$W = \int_{\alpha}^{\beta} \vec{F} \cdot d\vec{r} = \int_{V_0}^V p \cdot dV' \quad (1.40)$$

Pelas pressões envolvidas no processo de expansão e sua rapidez, como já explicitado, verifica-se que no tempo necessário para expelir a massa de água não há troca de calor significativa pelo sistema pressurizado e sua vizinhança. A transformação termodinâmica entre os estados inicial e final da expansão pode ser aproximado de uma transformação adiabática. Então a expressão para a 1ª Lei da Termodinâmica assume a seguinte forma:

$$\Delta U = Q - W \quad (1.41)$$

$$\Delta U = -W \quad (1.42)$$

$$W = -\Delta U \quad (1.43)$$

A expressão para a energia interna para o gás ideal é dada por:

$$U = c_V nT \quad (1.44)$$

Pode-se escrever o calor específico a volume constante como $c_V = kR$, onde k indicaria os graus de liberdade das moléculas que compõem o gás, todavia os valores tabelados para o ar atmosférico o aproximam de $\frac{3}{2}$, o qual passa a ser utilizado.

Tomando a equação de estado do gás ideal e isolando o termo da temperatura, visto que é uma grandeza de difícil medição nesta circunstância, pode-se determinar a variação sofrida pela energia interna apenas em função da pressão e volume, e, então, substituir na equação 1.43 de forma a calcular a integral existente na equação 1.40.

$$pV = nRT \quad (1.45)$$

$$T = \frac{pV}{nR} \quad (1.46)$$

Então:

$$W = -\frac{3}{2}nR(T_f - T_i) \quad (1.47)$$

$$W = \frac{3}{2}nR(T_i - T_f) \quad (1.48)$$

Substituindo a equação 1.46 na equação 1.48:

$$W = \frac{3}{2}(p_i V_i - p_f V_f) \quad (1.49)$$

Tanto a pressão, como o volume inicial são conhecidos, pois tratam das condições

iniciais. No estado final, no entanto, apenas o volume é conhecido, uma vez que se trata da situação em que toda a água foi expelida da câmara e a pressão ainda não se igualou a pressão externa, que é a pressão atmosférica.

Como fora assumido a expansão como sendo adiabática e o $c_v = \frac{3}{2}$, o coeficiente γ da expansão toma o valor de $\frac{5}{3}$. Isto pois, o produto entre a pressão e o volume elevado a gama, pV^γ , é constante para essa transformação.

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (1.50)$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \quad (1.51)$$

Combinando esses resultados com as equações 1.39, 1.40, 1.43 e 1.49, tem-se:

$$\frac{mv^2}{2} = \int_{V_0}^V p dV = W = -\Delta U \quad (1.52)$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} (p_i V_i - p_f V_f) \quad (1.53)$$

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \left[p_1 V_1 - p_1 V_f \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \right] \quad (1.54)$$

$$v = \left\{ \frac{3}{m} \left[p_1 V_1 - p_1 V_f \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.55)$$

Como v , neste caso, representa a assíntota ω , a expressão 1.56 se torna:

$$\omega = \left\{ \frac{3}{m} \left[p_1 V_1 - p_1 V_f \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.56)$$

O termo m observado na equação 1.56 representa a massa de água e ar a ser expelidas pelo foguete. Despreza-se, nesta etapa, a massa de ar pela ordem de grandeza observada na massa de água. Pode-se, a depender da conveniência, reescrevê-la em função de sua densidade e volumes já utilizados nas expressões anteriores.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.57)$$

$$\rho_{\text{água}} = \frac{m}{(V_2 - V_1)} \quad (1.58)$$

$$m = (V_2 - V_1) \cdot \rho_{\text{água}} \quad (1.59)$$

De posse de todos esses elementos, é possível montar a estrutura de cálculo numérico para que se efetuem as iterações necessárias a se determinar a velocidade do foguete ao fim da etapa de exaustão de água. Neste ponto, então, é necessário estabelecer os mecanismos de cálculo da posição do foguete, para que se tenham os elementos completos para a etapa posterior

da propulsão.

Como não se estabeleceu solução analítica para a equação 1.27, faz-se necessário, mais uma vez, o uso de método numérico para se determinar a posição. Nessas circunstâncias, o uso do método de Euler se mostra adequado, visto que deve obter os valores das velocidades indiretamente a partir do método RK3 anteriormente demonstrado. De forma análoga à lógica demonstrada para aceleração, aproxima-se a taxa de variação instantânea da posição por uma taxa média de variação da posição.

$$v(t) = \frac{dr}{dt} \approx \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (1.60)$$

$$v(t) = \frac{\Delta r}{\Delta t} = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{\Delta t} \quad (1.61)$$

$$r(t + \Delta t) = r(t) + v(t)\Delta t \quad (1.62)$$

Sendo, então, a expressão geral do método de Euler para a posição:

$$r_{n+1} = r_n + v\Delta t \quad (1.63)$$

De outro modo, expressando a equação 1.63 em termos das direções x e z :

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + v_x\Delta t \\ z_{n+1} = z_n + v_z\Delta t \end{cases} \quad (1.64)$$

Com isso, as informações referentes a etapa de ejeção da água na fase de propulsão, necessárias para prosseguir com análise, estão completas. Parte-se, então para a análise da etapa de ejeção do ar pressurizado.

Para início do exame, o ponto de partida segue o mesmo raciocínio desenvolvido anteriormente, a partir da 2ª Lei de Newton até a expressão contida na equação 1.9. Diferentemente da proposição adotada para velocidade de ejeção da água, uma curva de decaimento exponencial se encaixa de maneira mais adequada ao fenômeno observado. Então para a fase de ejeção de ar, a função temporal da velocidade de ejeção é dada por:

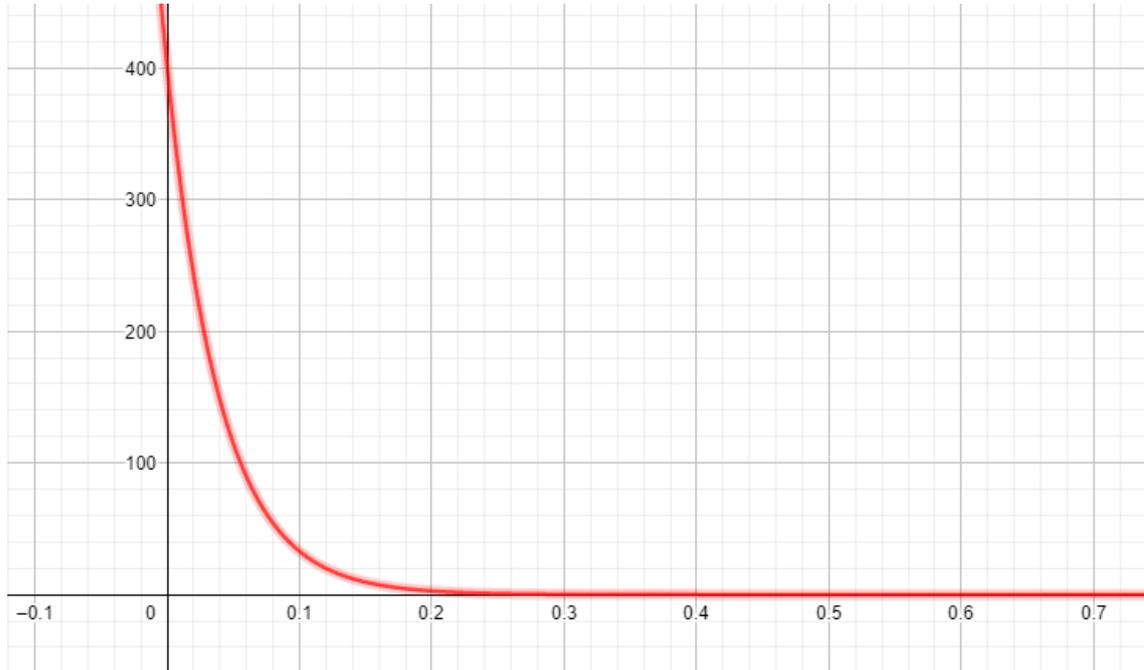
$$v_e = \delta e^{-\alpha t} \quad (1.65)$$

Na equação 1.65, o coeficiente delta refere-se à velocidade inicial de ejeção do ar, onde a curva cruza o eixo das ordenadas, conforme observado na Figura 46. O coeficiente pode ser obtido de modo análogo ao raciocínio desenvolvido para obtenção do coeficiente ω , a partir de um processo de expansão adiabática. Já o coeficiente alpha se refere a rapidez com que o decaimento ocorre, tendo como assíntota inferior o eixo das abscissas.

Na etapa anterior, a partir da equação de velocidade, obteve-se a função temporal da ejeção de massa de água. Isto pôde ser feito por causa da propriedade física de incompressibilidade da água, o que garante que sua densidade não varie. Neste caso, o ar não é dotado da mesma propriedade, então a densidade também assume uma função temporal, porém

como a forma com que densidade varia com o tempo não é faz parte do objeto de estudo, propõe-se, diretamente, que a massa de ar também siga um decaimento exponencial, com um comportamento similar ao que ocorre com a velocidade.

Figura 46: Gráfico da Equação 1.65



Fonte: Autor (2022).

Para todos os efeitos, a função temporal da densidade pode ser obtida seguindo os mesmos passos elaborados a partir da equação 1.11, encontrando-se uma equação diferencial de primeira ordem. Outrossim, a função temporal de ejeção de massa é proposta na seguinte formatação:

$$m = m_0 + m_{ar}e^{-\alpha t} \quad (1.66)$$

Os termos m_0 e m_{ar} referem-se, respectivamente, à massa do foguete vazio e à massa de ar pressurizado confinado na câmara de propulsão imediatamente antes da ejeção. Como no caso anterior, o ajuste de curva para os referidos índices será demonstrado a posteriori, empiricamente, com base em análise de vídeo. O diferencial dm é obtido pela derivada da função 1.66 em função do tempo.

$$dm = -\alpha m_{ar}e^{-\alpha t} dt \quad (1.67)$$

Substituindo, então, as equações 1.66 e 1.67 na equação 1.9, tem-se:

$$d\vec{v} = \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-\alpha t} e^{-\alpha t}}{m_0 + m_{ar}e^{-\alpha t}} dt + \vec{g} dt \quad (1.68)$$

$$\begin{cases} dv_x = \cos\theta \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at} e^{-at}}{m_0 + m_{ar} e^{-at}} dt \\ dv_z = \sin\theta \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at} e^{-at}}{m_0 + m_{ar} e^{-at}} dt - g dt \end{cases} \quad (1.69)$$

Diferentemente da equação 1.26, é possível calcular, sem maiores dificuldades, a solução analítica para a equação 1.68. Para tanto, integram-se as equações 1.69 com limites definidos pelo lapso dispendido para ejeção da massa de ar.

$$\int_{v_{x_0}}^{v_x} dv' = \int_0^t \cos\theta \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at'} e^{-at'}}{m_0 + m_{ar} e^{-at'}} dt' \quad (1.70)$$

Visto que o lado esquerdo da equação 1.70 tem solução trivial, dá-se ênfase ao lado direito da equação. A resolução é tida aplicando-se o método da integração por partes combinado com o método de substituição simples.

$$\int_0^t \cos\theta \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at'} e^{-at'}}{m_0 + m_{ar} e^{-at'}} dt' = \cos\theta \alpha \delta \int_0^t \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at'} e^{-at'}}{m_0 + m_{ar} e^{-at'}} dt' \quad (1.71)$$

$$u = e^{-at} \quad (1.72)$$

$$du = -\alpha e^{-at} dt \quad (1.73)$$

$$dv = \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at}}{m_0 + m_{ar} e^{-at}} dt \quad (1.74)$$

$$v = \int \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at}}{m_0 + m_{ar} e^{-at}} dt = \frac{1}{-\alpha} \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at}) \quad (1.75)$$

Então a integral do lado direito da equação 1.71 se torna:

$$\begin{aligned} & \frac{e^{-at}}{-\alpha} \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at}) - \\ & \int \left[\frac{1}{-\alpha} \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at'}) \right] (-\alpha m_{ar} e^{-at'}) dt \end{aligned} \quad (1.76)$$

$$\frac{e^{-at}}{-\alpha} \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at}) - \int \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at}) m_{ar} e^{-at} dt \quad (1.77)$$

$$\begin{aligned} & \cos\theta \alpha \delta \int_0^t \frac{\alpha m_{ar} \delta e^{-at'} e^{-at'}}{m_0 + m_{ar} e^{-at'}} dt' = \\ & \cos\theta \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\delta \ln(m_0 + m_{ar})}{\delta e^{-at} \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at})} \right] + \\ & \left[\frac{\delta}{m_{ar}} (m_0 + m_{ar} e^{-at}) \ln(m_0 + m_{ar} e^{-at}) \right] \\ & - (m_0 + m_{ar} e^{-at}) \\ & - \frac{\delta}{m_{ar}} (m_0 + m_{ar}) \ln(m_0 + m_{ar}) \\ & - (m_0 + m_{ar}) \end{aligned} \right\} \end{aligned} \quad (1.78)$$

Feito isto, resta então determinar o coeficiente δ que representa a velocidade inicial de ejeção. Como anteriormente proposto, pode-se encontrar tal coeficiente a partir do teorema da energia cinética e do trabalho termodinâmico realizado pela expansão adiabática gasosa. Com efeito, toma-se como base a equação 1.52 e passa-se a calcular o trabalho a partir da variação da energia interna.

Partindo da equação 1.49 e da relação abordada na equação 1.50, tem-se:

$$W = \frac{3}{2} (p_i V_i - p_f V_f)$$

Onde:

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (1.79)$$

Logo:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2} \left(p_1 V_1 - p_2 V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right) \quad (1.80)$$

$$v = \left\{ \frac{3}{m} \left[p_1 V_1 - p_2 V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.81)$$

Como v , neste caso, representa a velocidade inicial δ , a expressão 1.81 se torna:

$$\delta = \left\{ \frac{3}{m} \left[p_1 V_1 - p_2 V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1.82)$$

O termo m observado na equação 1.82 representa a massa de ar comprimido a ser expelidas pelo foguete. Pode-se, a depender da conveniência, reescrevê-la em função de sua densidade e volumes. Neste caso, o termo ρ_{ar} pode ser escrito em função da pressão inicial e temperatura ambiente. O termo R_{est} é uma constante específica para o ar seco e no SI ela admite um valor de: $R_{est} = 287,058 \frac{J}{kg \cdot K}$. Portanto:

$$\rho_{ar} = \frac{p_1}{R_{est} T} \quad (1.83)$$

$$m_{ar} = V_i \cdot \rho_{ar} = V_i \frac{p_i}{R_{est} T} \quad (1.84)$$

E, com isso, se completa a modelagem da fase de propulsão dos foguetes.

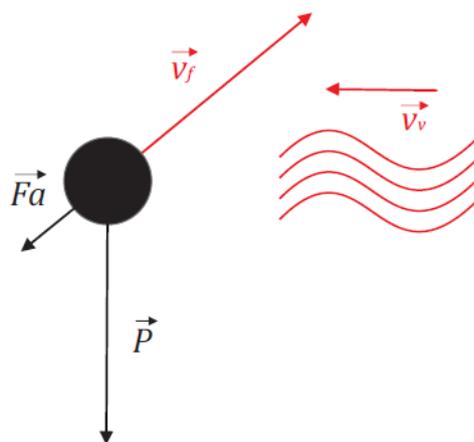
Voo livre

Nesta etapa, o sistema já não obedece às equações de foguete anteriormente descritas, visto que já não ejeta massa, passando a funcionar como um projétil balístico.

Apesar da influência atmosférica ser pequena, dado o formato aerodinâmico do objeto, não se pode considerar essa etapa do voo como inercial. Então passa-se a descrever como o arrasto aerodinâmico interfere na trajetória, assim como os efeitos decorrentes da velocidade e direção do vento.

No diagrama abaixo (Figura 47) é possível observar a configuração de forças atuantes no projétil durante a etapa de voo livre num recorte planar. Sobre o objeto que viaja com velocidade \vec{v} , aqui representado pelo círculo, atuam a força de arrasto \vec{F}_a e o peso \vec{P} .

Figura 47: Diagrama de forças



Fonte: Autor (2022).

A natureza da força de arrasto obriga que esta seja colinear ao vetor velocidade, uma vez que o arrasto aerodinâmico é uma força dependente da velocidade, do tipo $F(\vec{v})$.

Desta forma, pode-se proceder com a descrição matemática. A segunda Lei de Newton para o caso é dado por:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (2.1)$$

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - \vec{F}_a + \vec{F}_v \quad (2.2)$$

O termo \vec{F}_a diz respeito força de arrasto pode ser descrita da seguinte maneira:

$$\vec{F}_a(\vec{v}) = b_a \vec{v} + k_a v \vec{v} \quad (2.3)$$

O termo linear $b\vec{v}$ está relacionado à viscosidade e o termo quadrático $k\vec{v}^2$ está relacionado à colisão das moléculas do ar com o corpo, oferecendo, portanto, resistência. Este

fato acaba por implicar duas consequências imediatas: a primeira é que pelas dimensões do foguete, o termo linear tem uma influência desprezível, a segunda é que, pelo termo quadrático, a força de arrasto é colinear à velocidade, porém com sentido oposto, como dito anteriormente.

Desta maneira, a equação 2.2 assume a seguinte forma:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} - k_a v \vec{v} + \vec{F}_v \quad (2.4)$$

A constante de arrasto k , por sua vez é descrita em função da densidade do ar e da secção transversal do projétil:

$$k_a = \frac{1}{2} \rho_{ar} c A \quad (2.5)$$

Onde:

- ρ_{ar} = densidade do ar
- c = coeficiente de arrasto
- A = área da secção transversal

Ainda sobre o termo correspondente à força de arrasto na equação 2.4, pode-se reescrevê-lo com a seguinte configuração:

$$k_a v^2 = k_a v \vec{v} \quad (2.6)$$

Adotando-se o sistema cartesiano de coordenadas, orientando o eixo x na direção do lançamento e tomando θ como ângulo entre o vetor velocidade e o eixo x , decompõe-se a equação vetorial 2.6 nas seguintes equações:

$$F a_x = k_a v v \cos \theta = k_a v v_x \quad (2.7)$$

$$F a_y = 0 \quad (2.8)$$

$$F a_z = k_a v v \sin \theta = k_a v v_z \quad (2.9)$$

Onde:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} \quad (2.10)$$

A componente $F a_y$ é nula pois, sem influências externas, a dinâmica de um projétil, como é o caso, dá-se bidimensionalmente.

Por sua vez, o termo \vec{F}_v é relacionado a força que o vento exerce sobre o corpo do foguete, de maneira análoga pode-se descrevê-la a partir da equação 2.6. É válido destacar aqui que tanto a força de arrasto, como a força aplicada pelo vento tem suas direções orientadas no sentido do fluxo de ar. Desta forma, o arrasto tem sempre direção contrária à movimentação do corpo, no entanto, a força causada pela ação do vento dependerá das condições geométricas do sistema, sendo-lhe bastante a aplicação do formalismo vetorial. Outro destaque é sobre a componente vertical da velocidade do vento, que, tanto pela dificuldade técnica de medição

prática, quanto pela baixa influencia no sistema, é desconsiderada nessa modelagem.

Nos mesmos parâmetros de \vec{F}_a , F_v é descrito, então, como sendo:

$$\vec{F}_v = k_v v_v \vec{v}_v \quad (2.11)$$

Desta feita, a equação 2.4 decomposta assume as seguintes formas:

$$m \frac{dv_x}{dt} = -k_a v_x \sqrt{v_x^2 + v_z^2} + k_v v_v v_{v_x} \quad (2.12)$$

$$m \frac{dv_y}{dt} = k_v v_v v_{v_y} \quad (2.13)$$

$$m \frac{dv_z}{dt} = -k_a v_z \sqrt{v_x^2 + v_z^2} - mg \quad (2.14)$$

Nota-se que as equações 2.12 e 2.14 são equações diferenciais ordinárias acopladas, o que dificulta uma solução analítica. Então torna-se necessário empenhar uma solução numérica particular, onde as condições iniciais do problema são conhecidas.

Com o intuito de aumentar a precisão e diminuir a necessidade de processamento computacional adota-se o método de Runge-Kutta clássico de 4ª ordem – RK4, que passa a ser aplicado adiante. É salutar explicitar que aplicação mais detalhada do método RK4 denota uma passagem pelo método de Euler para que a compreensão física/geométrica se torne mais tangível.

Desta forma, para aproximações onde o intervalo de tempo Δt seja pequeno o suficiente:

$$\vec{a}(t) = \frac{d\vec{v}}{dt} \approx \frac{\Delta\vec{v}}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Isso implica que para o eixo x a equação 2.12 se torna:

$$a_x(t) = \frac{\Delta v_x}{\Delta t} = \frac{v_x(t + \Delta t) - v_x(t)}{\Delta t} \quad (2.16)$$

Logo:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + a_x(t)\Delta t \quad (2.17)$$

O termo a_x pode ser extraído da equação 2.12, logo:

$$a_x(t) = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t)]^2 + [v_z(t)]^2} v_x(t) + k_v v_v v_{v_x}}{m} \quad (2.18)$$

Como os termos iniciais do sistema de equações são conhecidos (Problema de Valor Inicial - PVI), a partir das equações 1.17 e 1.18, podemos repetir essas etapas em quantas iterações forem necessárias para se chegar ao valor desejado. Esse procedimento é conhecido como método de Euler para solução numérica de equações diferenciais ordinárias.

De maneira análoga, podemos aplicar o mesmo método para encontrar a posição $\vec{r}(t)$

do foguete.

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}}{dt} \approx \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Para o eixo x:

$$v_x(t) = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \quad (2.20)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + v_x(t)\Delta t \quad (2.21)$$

Com $v_x(t)$ dado pela equação 2.17.

Repetindo essas rotinas para os demais eixos, têm-se, para o eixo y:

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + a_y(t)\Delta t \quad (2.22)$$

$$a_y(t) = \frac{kv_v v_{v_y}}{m} \quad (2.23)$$

$$y(t + \Delta t) = y(t) + v_y(t)\Delta t \quad (2.24)$$

E para o eixo z:

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + a_z(t)\Delta t \quad (2.25)$$

$$a_z(t) = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t)]^2 + [v_z(t)]^2} v_z(t)}{m} - g \quad (2.26)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + v_z(t)\Delta t \quad (2.27)$$

Note que as equações 2.17, 2.21, 2.22, 2.24, 2.25 e 2.27 foram discretizadas e isto põe os termos a_x , a_y , a_z , v_x , v_y e v_z como os coeficientes angulares das respectivas equações (lineares). Desta forma, para que essa discretização não incorra em um erro significativo, o passo (Δt) deve ser muito pequeno, o que implica num número maior de iterações. O uso do método RK4 transforma esses coeficientes de inclinação em médias ponderadas com variações do passo (Δt), trazendo maior precisão para a solução numérica, permitindo passos maiores que no método de Euler.

Dispensando o formalismo geralmente utilizado no campo da matemática para tratar de funções, pode-se aplicar de maneira direcionada o método RK4. Trata-se a velocidade do vento como constante para o período no qual o foguete perfaz seu caminho, pois a trajetória se desenha em alguns segundos. Então, os termos $a_x(t)\Delta t$ e $a_z(t)\Delta t$ das equações 2.17 e 2.25 se tornam:

$$a_x(t)\Delta t = \frac{\Delta t}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (2.28)$$

$$a_z(t)\Delta t = \frac{\Delta t}{6} (M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4) \quad (2.29)$$

Uma vez que as funções $a_x(t)$ e $a_z(t)$ não são explicitamente dependentes do tempo,

os coeficientes K , utilizados para descrição do movimento na direção x , são dados por:

$$K_1 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t)]^2 + [v_z(t)]^2} v_x(t) + k_v v_v v_{v_x}}{m} \quad (2.30)$$

$$K_2 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_1 \frac{\Delta t}{2}]^2 + [v_z(t) + M_1 \frac{\Delta t}{2}]^2} [v_x(t) + K_1 \frac{\Delta t}{2}] + k_v v_v v_{v_x}}{m} \quad (2.31)$$

$$K_3 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_2 \frac{\Delta t}{2}]^2 + [v_z(t) + M_2 \frac{\Delta t}{2}]^2} [v_x(t) + K_2 \frac{\Delta t}{2}] + k_v v_v v_{v_x}}{m} \quad (2.32)$$

$$K_4 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_3 \Delta t]^2 + [v_z(t) + M_3 \Delta t]^2} [v_x(t) + K_3 \Delta t] + k_v v_v v_{v_x}}{m} \quad (2.33)$$

Por sua vez, os coeficientes M , utilizados para descrição do movimento na direção z , são descritos da seguinte maneira:

$$M_1 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t)]^2 + [v_z(t)]^2} v_z(t)}{m} - g \quad (2.34)$$

$$M_2 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_1 \frac{\Delta t}{2}]^2 + [v_z(t) + M_1 \frac{\Delta t}{2}]^2} [v_z(t) + M_1 \frac{\Delta t}{2}]}{m} - g \quad (2.35)$$

$$M_3 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_2 \frac{\Delta t}{2}]^2 + [v_z(t) + M_2 \frac{\Delta t}{2}]^2} [v_z(t) + M_2 \frac{\Delta t}{2}]}{m} - g \quad (2.36)$$

$$M_4 = \frac{-k_a \sqrt{[v_x(t) + K_3 \Delta t]^2 + [v_z(t) + M_3 \Delta t]^2} [v_z(t) + M_3 \Delta t]}{m} - g \quad (2.37)$$

Esse resultado transforma as equações 2.17 e 2.25 assumem a seguinte configuração:

$$v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \frac{\Delta t}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \quad (2.38)$$

$$v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + \frac{\Delta t}{6} (M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4) \quad (2.39)$$

E esse é o método RK4 para o sistema.

Como se pode perceber, a solução numérica das equações acima resulta num resultado também numérico, o que impossibilita a aplicabilidade do método RK4 das equações 2.21 e 2.27, visto que não temos funções descritivas para $v_x(t)\Delta t$ e $v_z(t)\Delta t$. Apesar disso, é possível a aplicação do método Runge-Kutta clássico de segunda ordem – RK2, também conhecido como método de Euler melhorado.

Os termos $v_x(t)\Delta t$ e $v_z(t)\Delta t$ das equações passam a ser:

$$v_x(t)\Delta t = \frac{\Delta t}{2} [v_x(t) + v_x(t + \Delta t)] \quad (2.40)$$

$$v_z(t)\Delta t = \frac{\Delta t}{2} [v_z(t) + v_z(t + \Delta t)] \quad (2.41)$$

Logo, as equações 2.21 e 2.27 são reescritas assim:

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_x(t) + v_x(t + \Delta t)] \quad (2.42)$$

$$z(t + \Delta t) = z(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_z(t) + v_z(t + \Delta t)] \quad (2.43)$$

As equações relativas ao eixo y são desenvolvidas analogamente. O termo $a_y(t)\Delta t$ da equação 2.22 se torna:

$$a_y(t)\Delta t = \frac{\Delta t}{6} (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \quad (2.44)$$

E os coeficientes L , utilizados para descrição do movimento na direção y , são dados por:

$$L_1 = \frac{k_v v_v v_{v_y}}{m} \quad (2.45)$$

$$L_2 = \frac{k_v v_v \left(v_{v_y} + L_1 \frac{\Delta t}{2} \right)}{m} \quad (2.46)$$

$$L_3 = \frac{k_v v_v \left(v_{v_y} + L_2 \frac{\Delta t}{2} \right)}{m} \quad (2.47)$$

$$L_4 = \frac{k_v v_v \left(v_{v_y} + L_3 \Delta t \right)}{m} \quad (2.48)$$

Logo, a equação 2.22 se torna:

$$v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + \frac{\Delta t}{6} (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \quad (2.49)$$

E, por conseguinte, utilizando o método RK2, a equação 2.24 passa a ser escrita com a seguinte expressão:

$$y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_y(t) + v_y(t + \Delta t)] \quad (2.50)$$

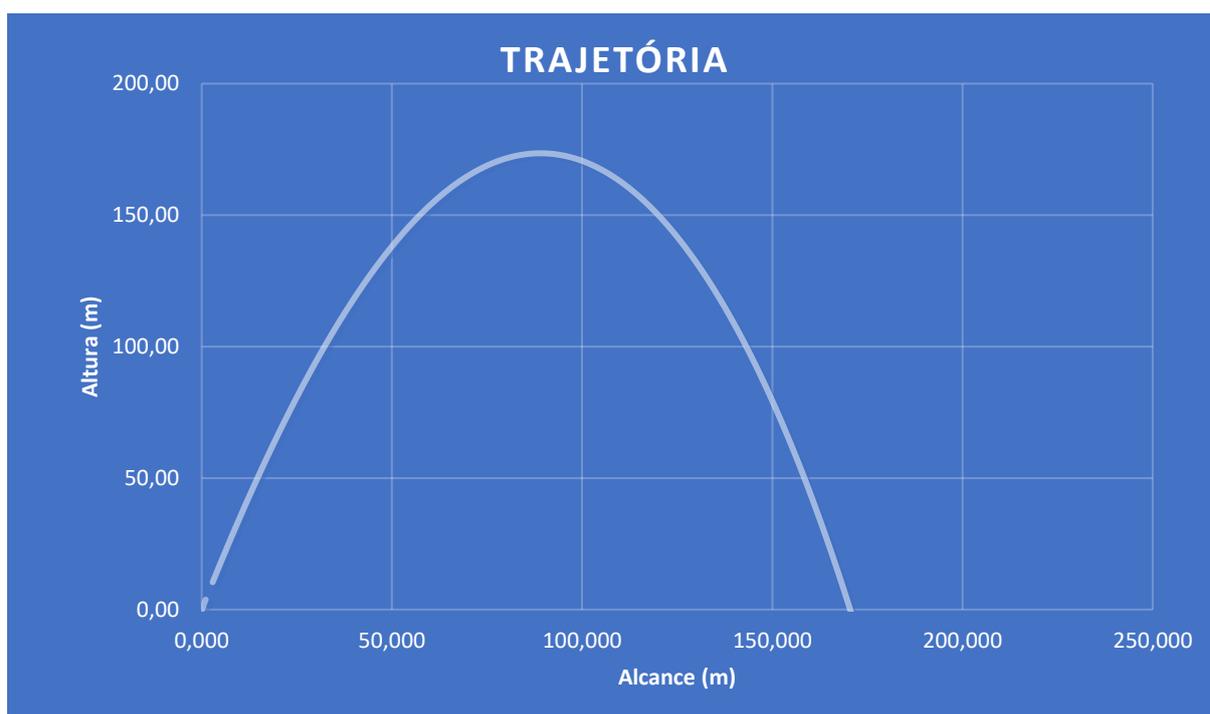
Compendiando as formulações, têm-se:

- $v_x(t + \Delta t) = v_x(t) + \frac{\Delta t}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4)$
- $v_y(t + \Delta t) = v_y(t) + \frac{\Delta t}{6} (L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4)$
- $v_z(t + \Delta t) = v_z(t) + \frac{\Delta t}{6} (M_1 + 2M_2 + 2M_3 + M_4)$
- $x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_x(t) + v_x(t + \Delta t)]$
- $y(t + \Delta t) = y(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_y(t) + v_y(t + \Delta t)]$

- $z(t + \Delta t) = z(t) + \frac{\Delta t}{2} [v_z(t) + v_z(t + \Delta t)]$

Com estas equações é possível efetuar tantas iterações quantas forem necessárias para se determinar a trajetória do foguete, como exemplo tem-se a figura 48. Além disso, em cada ponto da trajetória é possível visualizar a velocidade do projétil, o que será útil para a descrição matemática da dispersão aérea que tratará a próxima seção.

Figura 48: Gráfico de trajetória do foguete



Fonte: Autor (2022).

Dispersão aérea simulada

O sistema de dispersão aérea embarcado parte do princípio da expansão rápida, quase que adiabática, de ar comprimido, impulsionando um pistão que, por sua vez, efetuará o trabalho de expelir com velocidade a carga de sementes.

Utilizando as equações 1.34, 1.40 e 1.48, associado, mais uma vez, ao teorema da energia cinética, tem-se:

$$W = \Delta K \quad (3.1)$$

Onde:

$$W = \frac{3}{2} \left(p_i V_i - p_{atm} V_i \left(\frac{p_i}{p_{atm}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right) \quad (3.2)$$

Numa situação real, existe dissipação de uma parcela desse trabalho, além da parcela de energia relacionada a conservação do momento utilizada para impulsionar o canhão (foguete) na direção oposta à direção de disparo, que pode ser verificada experimentalmente, visto que depende das propriedades geométricas particulares do sistema de disparo.

Considerando um sistema de n corpos de massas idênticas m a serem dispersos, inicialmente em repouso em relação ao referencial onde se encontra embarcado, o termo ΔK pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\Delta K = \sum_{i=1}^n K_i + K_p \quad (3.3)$$

O termo K_p diz respeito à energia cinética do pistão.

$$\Delta K = \sum_{i=1}^n \frac{m v_i^2}{2} + \frac{m_p v_p^2}{2} = \frac{m}{2} \sum_{i=1}^n v_i^2 + \frac{m_p v_p^2}{2} \quad (3.4)$$

Considerando uma situação de quase uniformidade na distribuição energética durante o disparo, obtém-se:

$$W = \frac{nm}{2} v^2 + \frac{m_p}{2} v^2 \quad (3.5)$$

$$W = (nm + m_p) \frac{v^2}{2} \quad (3.6)$$

Onde:

$$v^2 = \frac{2W}{(nm + m_p)} \quad (3.7)$$

Vetorialmente, a velocidade de cada projétil é dada pela seguinte equação:

$$v = \left(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

Combinando as equações 3.7 e 3.8, tem-se:

$$\frac{2W}{(nm + m_p)} = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (3.9)$$

A título de simulação, pode-se pensar a equação 3.9 como a equação de uma esfera, de forma a atribuir valores para as componentes x , y e z da velocidade, observando suas restrições.

Assumindo uma distribuição gaussiana, é salutar normalizar a equação 3.9. Seja:

$$\frac{2W}{(nm + m_p)} = a^2 \quad (3.10)$$

$$\frac{v_x^2}{a^2} + \frac{v_y^2}{a^2} + \frac{v_z^2}{a^2} = 1 \quad (3.11)$$

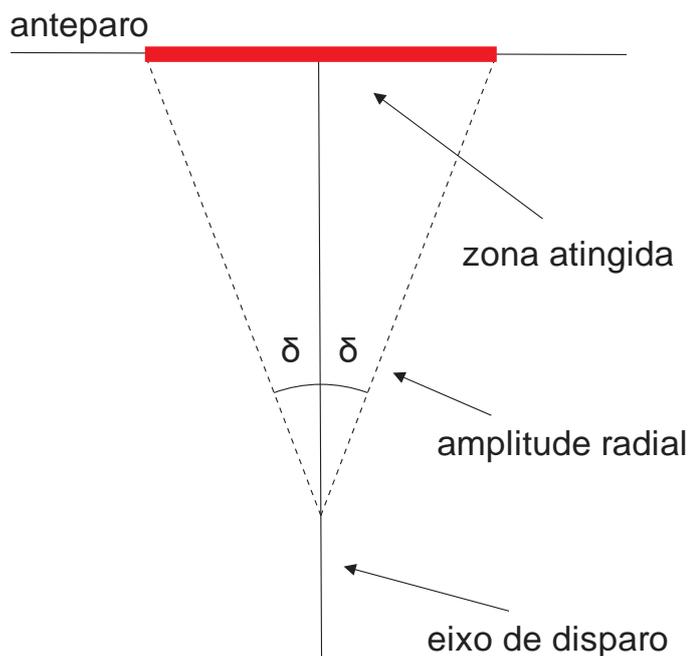
$$\frac{v_z^2}{a^2} = b \quad (3.12)$$

Com a equação normalizada, podemos atribuir valores à b de forma a gerar curvas de nível (circunferências). Essa atribuição deve obedecer a seguinte restrição:

$$0 \leq b \leq 1 \quad (3.13)$$

Note que para $b = 0$, a velocidade do projétil é radial, distribuída entre as componentes x e y , que mais adiante iremos descrever com maior atenção. No outro extremo, onde $b = 1$, a velocidade do projétil é apenas axial em z .

Figura 49: Diagrama de restrição de amplitude da distribuição



Fonte: Autor (2022).

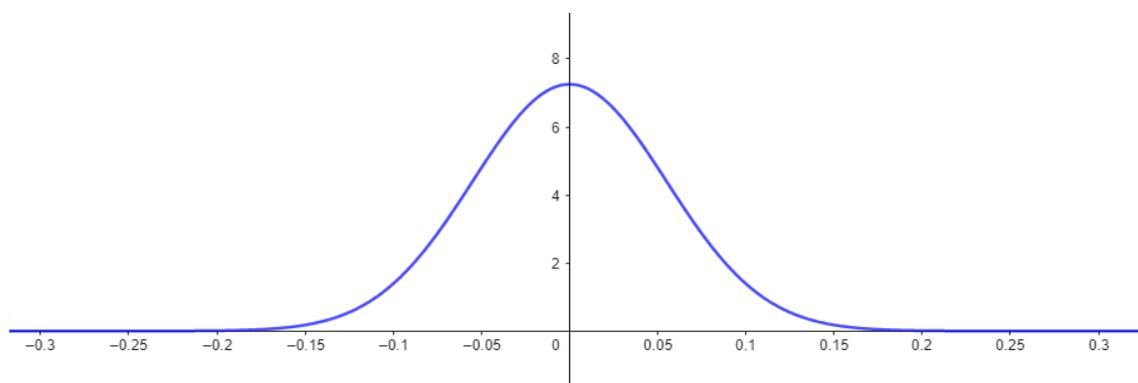
Apesar da possibilidade matemática estabelecida pela equação 3.13, existe uma restrição física, obtida empiricamente, no que diz respeito ao cone de espalhamento, dada a geometria do canhão de dispersão, limitando a amplitude radial (à um ângulo de aproximadamente 15° medido a partir do eixo de disparo (Figura 49). Dessa forma, tomando uma proporção linear, o percentual máximo da componente radial permitida pelo sistema é de aproximadamente 17% da velocidade total. a equação 3.13 assume a seguinte restrição:

$$0,83 \leq b \leq 1 \quad (3.14)$$

Para que a distribuição espacial obedeça a um padrão gaussiano as velocidades devem distribuir-se de mesma forma, assim para um sistema de n projéteis, atribuem-se n valores a b obedecendo a condição da relação 3.14. Contudo essa atribuição deve ocorrer em subconjuntos de domínio da função gaussiana ajustada onde o eixo das abcissas represente a proporção linear da amplitude angular medida a partir do eixo de disparo. A função com tais características, bem como seu gráfico (Figura 50) são mostrados abaixo:

$$f(x) = \frac{1}{0,055\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{0,055}\right)^2} \quad (3.15)$$

Figura 50: Curva de distribuição gaussiana ajustada



Fonte: Autor (2022).

Como a função é conhecida pelas suas propriedades probabilísticas, pode-se dividir o intervalo do domínio da função ($x_1 \leq x \leq x_2$), onde a probabilidade é maior que zero, pelo número de projéteis (n) e calcular o valor da função em cada um desses pontos. Outra forma seria estabelecer subintervalos dentro do domínio onde a probabilidade é maior que zero, atribuindo-lhes valores aleatoriamente dentro desses limites, de acordo com o percentual indicado pela probabilidade do intervalo.

Com os valores de b estabelecidos, as equações 3.11 e 3.12 se tornam:

$$\frac{v_x^2}{a^2} + \frac{v_y^2}{a^2} = 1 - b \quad (3.16)$$

$$v_x^2 + v_y^2 = a^2(1 - b) \quad (3.17)$$

Utilizando o auxílio de coordenadas polares, a equação 3.16 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$v_x = [a^2(1 - b)^2]^{\frac{1}{2}} \cos\theta \quad (3.18)$$

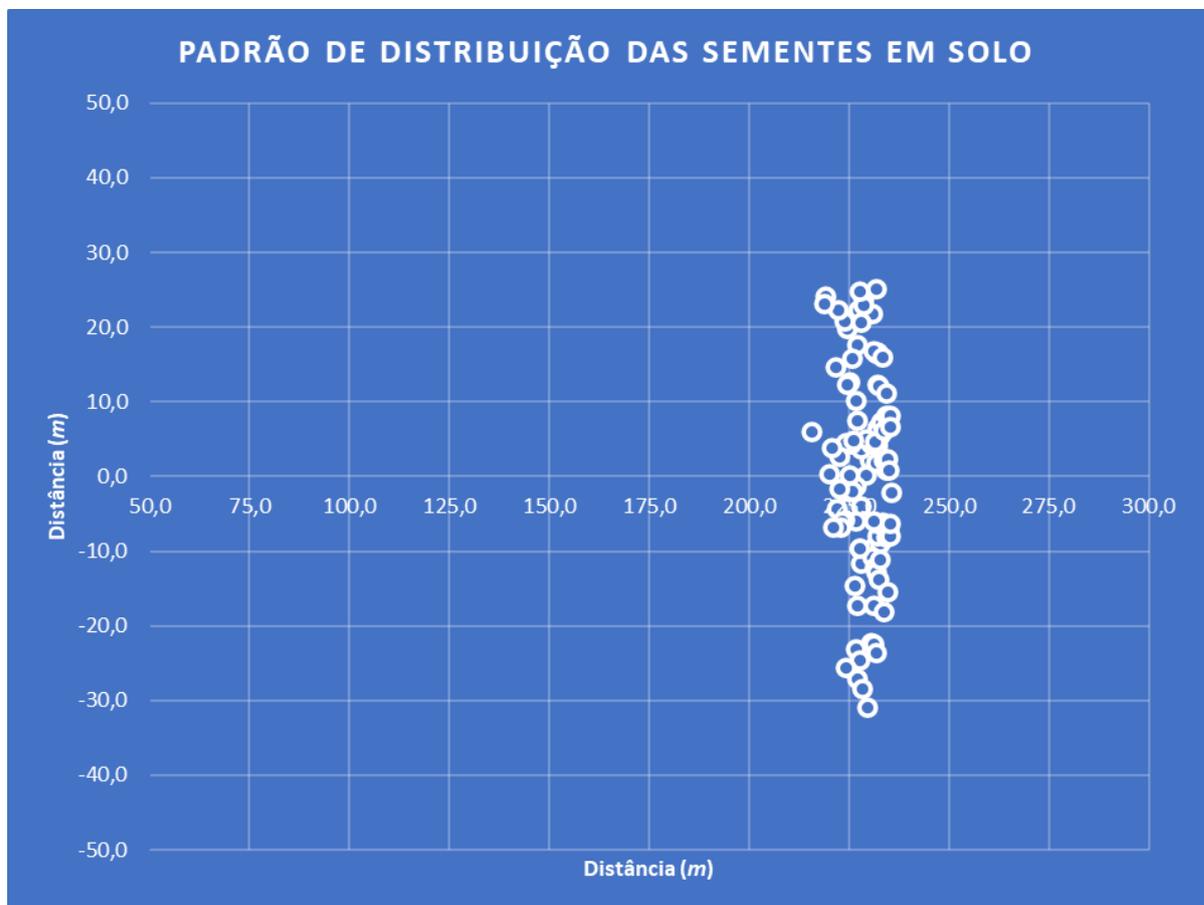
$$v_y = [a^2(1 - b)^2]^{\frac{1}{2}} \sin\theta \quad (3.19)$$

Onde:

$$0 \leq \theta \leq 2\pi \quad (3.20)$$

Desta forma, fazendo θ variar aleatoriamente dentro da restrição imposta pela equação 3.20, obtém-se os valores das componentes x , y e z da velocidade. Isto posto, conhecendo a posição e velocidade do foguete no momento da ejeção dos projéteis, as posições dos projéteis após atingirem o solo podem ser obtidas por método numérico, análogo aos desenvolvidos na seção de voo livre.

Figura 51: Plotagem de dispersão no solo



Fonte: Autor (2022).

O padrão de dispersão obtido com esse método pode ser visualizado plotando-se as posições x e y obtidas a partir das soluções numéricas encontradas (Figura 51). Nota-se que desta maneira é possível assumir, em certo grau, um controle da dispersão, podendo-se proporcionar condições de distribuição de sementes de modo similar ao encontrado em ambientes mais preservados do mesmo bioma. De maneira pragmática, conhecendo as taxas de germinação das espécies para as condições ambientais, é possível efetuar com precisão a técnica de nucleação com o intuito de recuperação de áreas degradadas.

Teste de voo e análise por vídeo

Os aspectos críticos na validação da modelagem proposta recaem sobre a verificação da velocidade de exaustão de matéria (água e ar comprimido) pela tubeira do foguete, visto que os demais já encontram estudos suficientes, precisos e consolidados na literatura da mecânica clássica há alguns séculos, uma vez que tratam sobre a dinâmica de projéteis.

Algumas proposições experimentais anteriores sugeriam a construção de equipamento específico para medir indiretamente a velocidade, como o uso de um tubo de *Pitot* para aferição da velocidade a partir da velocidade de escoamento do ar ou por efeito *Doppler* onde se insere um dispositivo emissor de som no foguete a uma frequência específica e em solo é captado tal som, analisando-se a variação de frequência devido à velocidade imprimida à fonte sonora. Tais aparatos não mediriam, ainda que indiretamente, a velocidade de escoamento, mas sim a velocidade do próprio foguete e tais resultados seriam verificados com a previsão teórica. Nesse ponto, uma ferramenta consolidada e pronta vem substituir todos esses instrumentos embarcados, que é a análise das grandezas físicas envolvidas na dinâmica do foguete por vídeo. Para tanto, se utilizou o software Tracker, que conta com ferramental facilitado para tais proposições (Figura 52).

Figura 52: Medição da velocidade por análise de vídeo



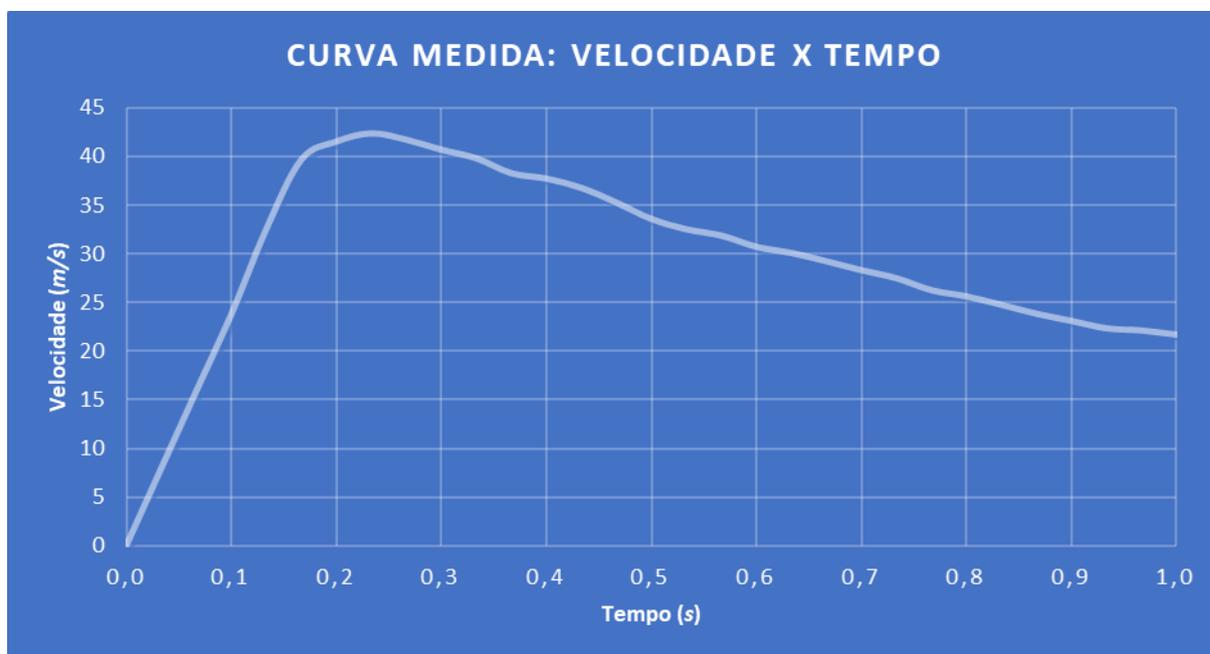
Fonte: Autor (2022).

Desta maneira, os testes de voo foram filmados, de forma a quantificar grandezas como aceleração, velocidade e posição dos foguetes, além de se avaliar a qualidade do voo

visualmente. *In loco* se verificou a estabilidade aerodinâmica do foguete e o funcionamento adequado dos sistemas de lançamento, dispersão e recuperação. Para uma análise mais apurada, procurou-se instalar a câmera em ângulo de visada perpendicular ao plano de trajetória do foguete, privilegiando, sobremaneira, o período acelerado do movimento. Foram anotadas as configurações de voo, como a massa do foguete vazio (sem água), volume da câmara de exaustão, volume de água abastecido, pressão da câmara e comprimento do foguete. Esses dados servem, tanto para calibração dos parâmetros geométricos do *Tracker*, quanto para alimentar a entrada do simulador.

Os vídeos em alta definição e em câmera lenta foram essenciais para um entendimento mais acurado da fenomenologia envolvida no processo de ejeção de massa pelos foguetes movidos à água pressurizada. A título de exemplificação pode-se comparar a análise de um dos lançamentos com a sua simulação. Na Figura 53 pode-se observar a curva de velocidade pelo tempo medida quadro a quadro. No software de análise é possível escolher um ponto de massa de referência, marcando-o a cada quadro e as grandezas cinemáticas são automaticamente calculadas. O software gera uma tabela e um gráfico com as grandezas de interesse.

Figura 53: Curva medida de velocidade em função do tempo



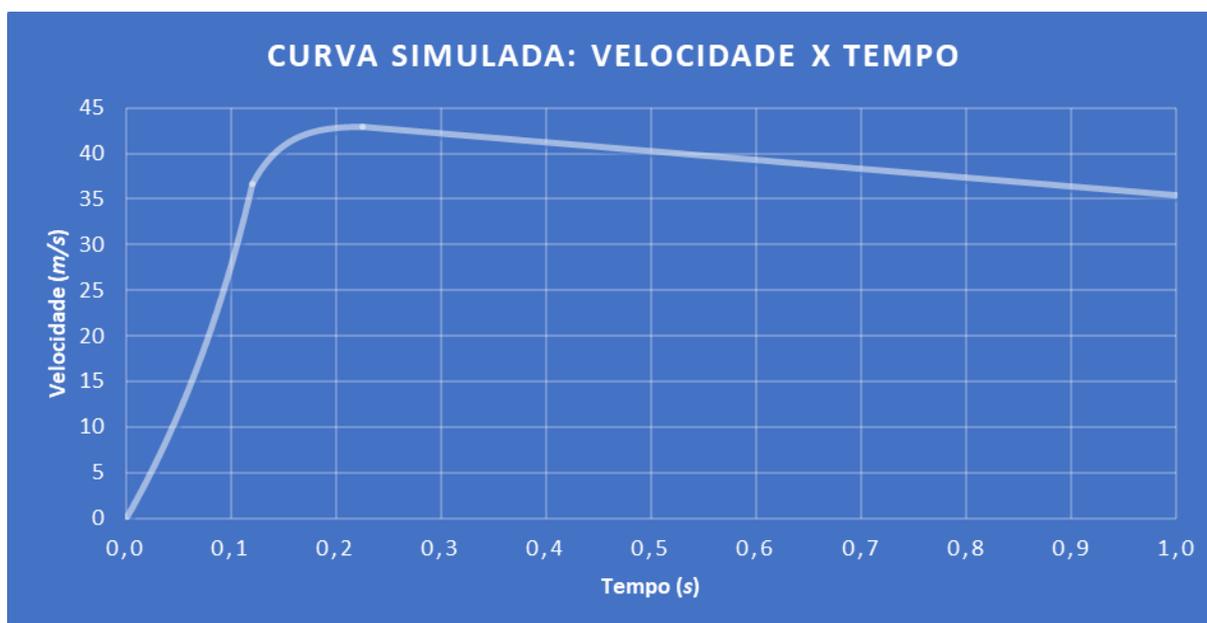
Fonte: Autor (2022).

Após várias análises, foi possível corrigir as simulações preliminares que traziam muitas situações ideais, o que incorriam numa série de inconsistências os resultados esperados entre os dados observados. Dada a pouquíssima literatura disponível para essa classe de

foguetes, foi necessário trilhar todo o caminho basicamente do zero. A revisão bibliográfica se deu no sentido de retirar dos textos publicados as informações necessárias à elaboração de simuladores e em nenhum dos casos houve uma correspondência satisfatória entre simulação e dados observacionais. De outra perspectiva, utilizou-se os simuladores disponíveis ou acessíveis e a mesma inconsistência fora observada.

Nesse contexto, a elaboração do simulador, destacado com o devido rigor na seção subsequente deste texto, rendeu resultados esperados muito próximos aos dados observados, com um percentual de erro ínfimo. Outro fator interessante de se destacar são as tendências de comportamento em correspondência com a realidade. Na Figura 54 pode-se observar a curva de velocidade pelo tempo extraída das simulações.

Figura 54: Curva simulada de velocidade em função do tempo



Fonte: Autor (2022).

É possível perceber, com certa facilidade, a correlação de comportamento entre as curvas mostradas nas Figuras 53 e 54. Na região acelerada, por exemplo, nota-se o mesmo intervalo de tempo de cerca de 0,2 segundo entre o repouso e ponto máximo de velocidade atingido. A partir do ápice, o foguete entra em um regime inercial, apenas submetido à resistência do ar e à gravidade e a velocidade tende a decrescer monotonamente até que o foguete atinja o apogeu da trajetória. Esse trecho analisado, período acelerado, foi, de fato, o maior desafio para o entendimento correto do comportamento dessa classe de foguetes, visto que os demais trechos obedecem a um regime de movimento balístico clássico de projétil.

Há de se destacar ainda uma falsa incoerência entre a simulação e os dados no que diz

respeito ao decrescimento de velocidade, Nota-se um decrescimento da velocidade mais acentuado nos dados obtidos por análise de vídeo, do que o observado no gráfico da simulação. Há de se destacar ainda uma falsa incoerência entre a simulação e os dados no que diz respeito ao decrescimento de velocidade, Nota-se um decrescimento da velocidade mais acentuado nos dados obtidos por análise de vídeo, do que o observado no gráfico da simulação. Tal pseudo-inconsistência pode ser notada devido a um fenômeno geométrico de percepção de perspectiva, uma vez que a câmera que capturou as imagens do foguete ficava pouco acima do plano da superfície e, à medida que o foguete sobe, o erro de medição cresce. Isto acontece pelo fato de o elemento de calibração de distância, utilizado para o cálculo de deslocamento do *software*, é o próprio corpo do foguete ainda parado na base de lançamento. No instante de maior velocidade, o foguete encontra-se a cerca de 6 metros do ponto de lançamento, onde o erro de leitura atribuído à perspectiva é insignificante, contudo, no instante 1,2 segundo, a altitude já ultrapassa os 30 m de altura, incorrendo num erro significativo, como se percebe da leitura dos gráficos. Outra análise cabível é que, após toda a ejeção de água e ar comprimido pelo foguete, o movimento do foguete é balístico, sendo sua descrição física bastante sedimentada pela literatura competente, não havendo qualquer controvérsia ou necessidade de correções na modelagem para essa etapa da trajetória, corroborando, mais uma vez o erro atribuído a diferença de perspectiva na tomada das medidas pelo método utilizado.

Dada a confiança obtida na qualidade das simulações, tem-se, portanto, um sistema passível de repetibilidade dos resultados e uma ferramenta útil no quesito de planejamento e execução da dispersão aérea das sementes, visto que o fator de previsibilidade foi alcançado.

APÊNDICE III: Análise de custos de operação

Análise de custos estimados para reflorestamento utilizando-se o sistema de semeadura aérea por foguetes hidropneumáticos. Esta análise considera os custos com equipamentos, instrumentos e software, tidos como fixos; custos com aluguéis de veículos e galpões, mão-de-obra e combustível, tidos como operacionais; e custos com insumos (sementes e peletização). Tais elementos integram a contabilização de cenários simulados, fidedignos a circunstâncias reais eventualmente encontradas. Os preços estipulados foram obtidos a partir de conferências sumárias sobre médias de preços praticados pelo mercado no ano de 2024.

Com isso, três cenários contendo áreas diferentes foram criados (100 ha, 1000 ha e 10.000 ha) de forma a simular operações utilizando apenas a tecnologia proposta neste trabalho. Pôde-se então calcular o custo por hectare nos três cenários, assim como um custo por hectare médio, de forma a servir de comparativo com preços reais observados em projetos concretos de reflorestamento.

1 Foguetes (3 unidades por equipe):

- Material do corpo do foguete (Fibra de vidro e ABS): R\$ 450,00
- Componentes internos (Impressão 3D em ABS): R\$ 300,00

Subtotal: R\$ 750,00

2 Sistema de pressurização (1 unidade por equipe):

- Compressor especial para altas pressões: R\$ 1500,00
- Bomba diafragma: R\$ 100,00
- Tanques de armazenamento de água (200 litros): R\$ 120,00
- Tubulação e conectores (Hidráulica): R\$ 1000,00

Subtotal: R\$ 2720,00

3 Sistema de dispersão de sementes (1 unidade por equipe):

- Compartimentos de armazenamento de sementes (Caixa plástica): R\$ 500,00
- Mecanismo de liberação das sementes (Canhão de ar embarcado): R\$ 450,00
cada, 3 unidades por equipe

Subtotal: R\$ 1850,00

4 Equipamentos de controle e lançamento (1 unidade por equipe):

- Controladores eletrônicos (Arduino Nano, 3 unidades por equipe): R\$ 36,00
- Sensores e atuadores (transdutor de pressão, 2 unidades por equipe): R\$ 120,00
- Estrutura de lançamento (Robótica): R\$ 600,00

Subtotal: R\$ 756,00

5 Software de controle (único):

- Desenvolvimento do software: R\$ 8000,00
- Licenciamento de software adicional: R\$ 1000,00

Subtotal: R\$ 9000,00

6 Custos Operacionais diários

- Taxa de semeadura: 4 ha/dia por equipe
- Número de trabalhadores: 2 por equipe
- Valor da diária de cada trabalhador: R\$ 200,00

Custo de mão-de-obra diário por equipe: R\$ 400,00

7 Deslocamento:

- Diária de caminhonete utilitária a diesel: R\$ 250,00
- Distância média por dia de operação: 50 km
- Consumo médio de uma caminhonete: 8 km/l
- Custo do diesel: R\$ 6,00 por litro
- Consumo diário de diesel por equipe: $50 \text{ km} / 8 \text{ km/l} = 6,25 \text{ litros}$

Custo diário total de deslocamento por equipe: R\$ 287,50

8 Custo de Sementes

- Custo das sementes florestais: R\$ 200,00 por quilo
- Quantidade de sementes por hectare: 1 quilo

9 Armazenamento e suporte

- Aluguel mensal de galpão: R\$ 5.000,00

Conclusão por Cenários

10 CENÁRIO 1

10.1 Operação de 100 ha

- Número de hectares: 100
- Número de equipes: 1
- Número de hectares semeados por dia: 4 ha/dia
- Número de dias de operação: 25 dias

10.2 Custos Operacionais

- Custo total de mão-de-obra: 25 dias x R\$ 400,00 = R\$ 10.000,00
- Custo total de deslocamento: 25 dias x R\$ 37,50 = R\$ 7.187,50
- Aluguel mensal de galpão: R\$ 5.000,00

Total de custos operacionais: R\$ 22.187,50

10.3 Custos Fixos:

- Foguetes: R\$ 750,00 (para 1 equipe)
- Sistema de pressurização: R\$ 2720,00 (para 1 equipe)
- Sistema de dispersão de sementes: R\$ 1850,00 (para 1 equipe)
- Equipamentos de controle e lançamento: R\$ 756,00 (para 1 equipe)
- Software de controle: R\$ 9000,00 (único)

Total de custos fixos: R\$ 15.076,00

10.4 Custo de Sementes e Peletização:

- Custo total de sementes: R\$ 20.000,00
- Custo total de peletização das sementes: R\$ 10.000,00

Total de sementes e peletização: R\$ 30.000,00

10.5 Cálculo do Custo Total:

- Custo fixo: R\$ 15.076,00
- Custo operacional: R\$ 22.187,50
- Custo de sementes e peletização: R\$ 30.000,00

Custo total: R\$ 67.263,50

10.6 Custo por hectare:

- Custo por hectare: R\$ 62.263,50/ 100 ha = R\$ 672,64

10.7 Resumo para o Cenário 1:

- Custo total: R\$ 67.263,50
- Custo por hectare: R\$ 672,64
- Número de dias de operação: 25 dias

11 CENÁRIO 2**11.1 Operação de 1000 ha**

- Número de hectares: 1000
- Número de equipes: 4
- Número de hectares semeados por dia: 16 ha/dia
- Número de dias de operação: 63 dias

11.2 Custos Operacionais

- Custo total de mão-de-obra: 63 dias x R\$ 1600,00 = R\$ 100.800,00
- Custo total de deslocamento: 63 dias x R\$ 1.150,00 = R\$ 72.450,00
- Aluguel mensal de galpão: R\$ 12.000,00

Total de custos operacionais: R\$ 185.250,00

11.3 Custos Fixos:

- Foguetes: R\$ 3000,00
- Sistema de pressurização: R\$ 10.880,00
- Sistema de dispersão de sementes: R\$ 7400,00
- Equipamentos de controle e lançamento: R\$ 3024,00
- Software de controle: R\$ 9000,00

Total de custos fixos: R\$ 33.304,00

11.4 Custo de Sementes e Peletização:

- Custo total de sementes: R\$ 200.000,00

- Custo total de peletização das sementes: R\$ 100.000,00

Total de sementes e peletização: R\$ 300.000,00

11.5 Cálculo do Custo Total:

- Custo fixo: R\$ 33.304,00
- Custo operacional: R\$ 185.250,00
- Custo de sementes e peletização: R\$ 300.000,00

Custo total: R\$ 518.554,00

11.6 Custo por hectare:

- Custo por hectare: R\$ 518.554,00 / 1000 ha = R\$ 518,56

11.7 Resumo para o Cenário 2:

- Custo total: R\$ 518.554,00
- Custo por hectare: R\$ 518,56
- Número de dias de operação: 63 dias

12 CENÁRIO 3

12.1 Operação de 10.000 ha

- Número de hectares: 10.000
- Número de hectares semeados por dia: 160 ha/dia
- Número de dias de operação: 63 dias

12.2 Custos Operacionais

- Custo total de mão-de-obra: 63 dias x R\$ 16.000,00 = R\$ 1.008.000,00
- Custo total de deslocamento: 63 dias x R\$ 11.500,00 = R\$ 724.500,00
- Aluguel mensal de galpão: R\$ 12.000,00

Total de custos operacionais: R\$ 1.744.500,00

12.3 Custos Fixos:

- Foguetes: R\$ 30.000,00 (para 40 equipes)
- Sistema de pressurização: R\$ 108.800,00 (para 40 equipes)

- Sistema de dispersão de sementes: R\$ 74.000,00 (para 40 equipes)
- Equipamentos de controle e lançamento: R\$ 30.240,00 (para 40 equipes)
- Software de controle: R\$ 9000,00 (único)

Total de custos fixos: R\$ 252.040,00

12.4 Custo de Sementes e Peletização:

- Custo total de sementes: R\$ 2.000.000,00
- Custo total de peletização das sementes: R\$ 1.000.000,00

Total de sementes e peletização: R\$ 3.000.000,00

12.5 Cálculo do Custo Total:

- Custo fixo: R\$ 252.040,00
- Custo operacional: R\$ 1.744.500,00
- Custo de sementes e peletização: R\$ 3.000.000,00

Custo total: R\$ 4.996.540,00

12.6 Custo por hectare:

- Custo por hectare: R\$ 4.996.540,00/ 10.000 ha = R\$ 499,66

12.7 Resumo para Cenário 3:

- Custo total: R\$ 4.996.540,00
- Custo por hectare: R\$ 499,66
- Número de dias de operação: 63 dias

13 Custo médio por hectare

- R\$ 563,62