

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PARÂMETROS DE
DISPERSÃO AÉREA DE SEMENTES UTILIZANDO DRONES NO
CONTEXTO DA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Jonanthan Valença Aquino

Dissertação de Mestrado

Rondonópolis-MT: março/2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PARÂMETROS DE
DISPERSÃO AÉREA DE SEMENTES UTILIZANDO DRONES NO
CONTEXTO DA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Jonanthan Valença Aquino

Orientador: Normandes Matos da Silva

Co-orientador: Vitor Souza Martins

Dissertação de Mestrado

Rondonópolis-MT: março/2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE RONDONÓPOLIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E TECNOLOGIA AMBIENTAL

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE PARÂMETROS DE
DISPERSÃO AÉREA DE SEMENTES UTILIZANDO DRONES NO
CONTEXTO DA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

Jonanthan Valença Aquino

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos necessários a obtenção do Grau de Mestre em Gestão e Tecnologia Ambiental, área de concentração Gestão e Tecnologias Ambientais, opção Acadêmica.

Aprovado por:

Normandes Matos da Silva, Doutor em Ecologia de Ecossistemas Terrestres e Aquáticos –
USP (Orientador)

Camila Leonardo Miotto , Doutora em Tecnologias Ambientais – UFMS (Examinador
Interno)

Alisson Andre Ribeiro, Doutor Tecnologias Ambientais – UFMS (Examinador Externo)

Rondonópolis-MT: março/2023

AQUINO, J. V

Modelagem computacional de parâmetros de dispersão aérea de sementes utilizando drones no contexto da recuperação de áreas degradadas, 74 p., 297 mm, (UFR-CDS, Mestre, Gestão e Tecnologia Ambiental, 2023).

Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Rondonópolis – Campus de Rondonópolis.

- | | |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Recuperação de áreas degradadas | 2. Semeadura aérea com drones |
| 3. Reflorestamento | 4. Machine Learning |

É concedida à Universidade Federal de Rondonópolis para reproduzir cópias desta dissertação e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jonathan Valença Aquino

DEDICATÓRIA

À minha mãe que me ensina com seu exemplo de vida e superação e também à toda minha família.

À minha companheira de vida, por todo seu amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

É com imensa gratidão que finalizo minha dissertação de mestrado e gostaria de expressar meus agradecimentos a todos que contribuíram para a realização desta etapa.

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder saúde e perseverança para concluir este trabalho mesmo em um período de pandemia.

Agradeço também à minha família pelo apoio e incentivo incondicional em todas as fases da minha vida acadêmica. Aos meus pais e avós, e irmãos, meu agradecimento especial pela educação, valores e amor pelo conhecimento que me foram transmitidos.

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Normandes, por sua dedicação, paciência e orientações valiosas para vida acadêmica e profissional.

Ao meu coorientador, professor Vitor, que se dispôs a abraçar este projeto compartilhando sua experiência acadêmica e sempre prestativo.

Ao professor Domingos, que me acompanhou desde a graduação sempre me incentivando no desenvolvimento acadêmico e profissional.

A todos os professores do Programa de Pós Graduação em Gestão e Tecnologia Ambiental que somaram com minha formação dando todo suporte necessário e oportunidades para meu crescimento.

Não podia deixar de agradecer a Fundação de Apoio Amparo e Pesquisa (FAPEMAT) pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado para Desenvolvimento de Produto Tecnológico.

Agradeço também à equipe da empresa XFLY, que durante esse tempo sempre se dispôs a sanar dúvidas técnicas além de ser uma parceira no desenvolvimento de equipamentos que apoiando as pesquisas do Laboratório.

Agradeço ao Lot Amorós, criador do projeto Dronecoria, que inspirou todo o início dessa pesquisa.

Ao Ministério Público, que graças ao seu apoio financeiro por possibilitou essa e outras inúmeras pesquisas.

Aos meus amigos, Ronaldo, Mateus, Jadson e Renato, que me ajudaram operacionalizar meu experimento de campo, sem essa ajuda isso não seria possível.

À minha companheira de vida, Dalila, que esteve sempre ao meu lado em todos os momentos difíceis e alegres, me dando força e todo apoio necessário para continuar minha trajetória.

Finalmente, agradeço a todos os professores da UFR que contribuíram para a minha formação, enriquecendo meu conhecimento e me motivando a buscar sempre o melhor.

Concluir mais essa importante etapa da minha vida acadêmica, e novamente expresse minha gratidão a todos que contribuíram para esse resultado. Muito obrigado!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- RPA Hexacóptero modelo X800 com sistema de dispersão embarcado. Fonte: autor.	29
Figura 2- Dispenser de sementes. Fonte: autoria própria	30
Figura 3 Procedimento de obtenção da capacidade máxima do dispensador com sementes de feijão. (a) peso do equipamento vazio e (b) peso do equipamento totalmente preenchido. Fonte: autor.....	31
Figura 4 - Interface do Software Mission Planner durante o processo de configuração dos parâmetros de velocidade do servo motor. Fonte: autor.....	32
Figura 5 - Procedimento de determinação da vazão do dispenser de sementes. A balança posicionada sobre a balança registrando as variações de peso a cada minuto. (1) cabo de alimentação e sinal da placa controladora, (2) saída do dispenser de sementes, (3) coletor, (4) balança de precisão, (5) reservatório do dispenser com sementes. Fonte: autor.	33
Figura 6 - Demarcação do local de realização do experimento de campo. Área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis - UFR. Fonte: Google Earth Pro, 2022.....	34
Figura 7 - Desenho experimental para estudo do padrão de espalhamento das sementes em solo após serem liberadas por RPA. Os barbantes foram dispostos em raios de 2,3,4 e 5 metros. Fonte: autor.....	35
Figura 8 - Procedimento de voo. (a) posicionamento inicial da aeronave ao centro da pista. (b) a aeronave pairando acima do solo durante o alinhamento com apoio de um observador auxiliar posicionado ortogonalmente à linha de visada do piloto. Fonte: autor	36
Figura 9 - Fluxograma geral de trabalho. Fonte: autor.....	37
Figura 10 - Exemplos de locais que foram coletadas as amostras para construção do dataset. Fonte: autor.....	38
Figura 11 - A imagem apresenta a sequência do processamento da área e obtenção dos polígonos georreferenciados. (a) imagem original, (b) imagem classificada, (c) imagem binarizada e (d) imagem original com os polígonos georreferenciados. Fonte: autor.	42
Figura 12 - Curvas de vazões do dispenser com sementes ao longo das 10 repetições. Fonte: autor	43
Figura 13 - Gráfico das médias das vazões do equipamento. As letras representam as médias que diferem entre si. Fonte: autor.....	47

Figura 14 - Matriz de correlação das variáveis temperatura, velocidade do vento e vazão. Fonte: Autor.....	48
Figura 15 – Distribuição das sementes nos raios de coleta nos raios de coleta para os diferentes tratamentos e repetições. Fonte: autoria própria.....	50
Figura 16 – Mosaico classificado com os modelos treinados. Fonte: autor.....	53
Figura 17 – Recorte da imagem classificada com os polígonos georreferenciados que gerados automaticamente pelo script em Python. Fonte: autor.	54
Figura 18 A figura ilustra três exemplos de curvas de vazão do sistema de dispersão ao longo do tempo. (a) representa um sistema de baixa eficiência que devido à baixa vazão do sistema, o tempo de esvaziamento (T_e) é superior ao Tempo de voo (T_v), logo deverá retirar carga do sistema para não retornar o voo com sementes no reservatório. (b) representa um sistema com a vazão ideal suficiente para obter um tempo de esvaziamento é igual ao tempo de voo. (c) representa um sistema de baixa eficiência onde a vazão é suficiente para esvaziar o reservatório, porém capacidade de carga (C_r) é inferior ao payload por limitação do reservatório. Fonte: autor.....	57
Figura 19 A figura ilustra o perfil de distribuição de sementes liberadas em diferentes alturas. Em menores altitudes as sementes tendem a se concentrar na linha de voo com uma faixa útil de dispersão menor, e em maiores altitudes há uma maior dispersão das sementes com uma faixa útil de dispersão mais larga.	60
Figura 20 A figura ilustra as linhas de voo de uma RPA. A área tracejada representa a área total realizada por voo, e as destacadas representam a área útil de dispersão, que está ligada à altura do drone e ao padrão de espalhamento das sementes no solo.	62
Figura 21 - Planilha automatizada para dimensionamento operacional da semeadura aérea com RPA e preenchida previamente com valores fictícios para exemplificação de uso. Fonte: Autor.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Descrição técnica da RPA modelo X800. Fonte: www.xflytecnologia.com.br/x800bio	28
Tabela 2 Tabulação dos dados coletados no experimento.....	45
Tabela 2 Resultados descritivos mais detalhados de média e variância dos tratamentos analisados.	46
Tabela 3 Análise de variância para as médias dos tratamentos a 5% de significância.....	46

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	4
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABELAS	10
RESUMO	13
1. INTRODUÇÃO	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 ÁREA DEGRADADA	18
2.2 TÉCNICAS DE REVEGETAÇÃO	18
2.3 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS – RPA.....	21
2.4 REGULAMENTAÇÃO DA RPA NO BRASIL	21
2.5 REGULAMENTAÇÃO DAS RPAS AGRÍCOLAS.....	23
2.6 DRONES E MEIO AMBIENTE	24
3. MATERIAL E MÉTODO.....	28
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	28
3.1.1 RPA	28
3.1.2 Dispenser de sementes	29
3.1.3 Sementes de Feijão branco	30
3.2 EXPERIMENTO PILOTO COM DISPERSOR	30
3.3 EXPERIMENTO DE SEMEADURA AÉREA NO CAMPO.....	33
3.4 AUTOMATIZANDO A CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DE SOLO COM USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	37
3.4.1 Construção do dataset para treinamento de modelos de Inteligência Artificial	37
3.4.2 Aplicação dos modelos treinados para classificar imagens de Drone.....	40
3.4.4 Obtenção das áreas de solo exposto	41
4. RESULTADOS	43
4.1 TESTES DE BANCADA	43
4.2 TESTE DE CAMPO	44
4.2.1 descrição dos dados.....	44
4.2.2 Vazão do sistema.....	46
4.2.3 Padrão de distribuição espacial	49
4.3 MÉTRICAS DOS MODELOS TREINADOS	51
4.3.1 Randon Forest – RF	51
4.3.2 K Nearest Neighbor - KNN.....	52

4.3.3 Logistic Regression – RL.....	52
4.4 DIMENSIONAMENTO OPERACIONAL DE RPAS PARA DISPERSÃO AÉREA DE SEMENTES.....	55
4.4.1 Parâmetros da RPA e dispersor de sementes	55
4.4.2 Parâmetros relacionados à semente.....	58
4.4.3 Calculando o número de voos	59
4.4.4 Distância linear total de Voo - DLT.....	59
4.4.5 Quantidade de sementes por metro linear	60
4.4.6 Velocidade e Vazão da RPA	60
4.4.7 Área de dispersão por voo.....	61
4.4.8 Área útil de dispersão por voo.....	61
4.4.9 Cálculo da produtividade diária	62
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
6. REFERÊNCIAS.....	66

RESUMO

A demanda por recuperação de áreas degradadas no Brasil é significativa e tecnologias como as aeronaves remotamente pilotadas, popularmente conhecidas como drones, podem oferecer escalabilidade e reduzir os riscos à vida humana nos trabalhos de campo. Embora os drones estejam ganhando espaço em vários segmentos da indústria do reflorestamento, ainda faltam referências de parâmetros para operacionalizá-los em projetos de recuperação de áreas degradadas. Para preencher essa lacuna, foram realizados estudos do comportamento da faixa de dispersão em função da altura, com o objetivo obter o padrão da dispersão em diferentes alturas de voo. O estudo demonstrou que em maiores alturas em relação ao solo, a faixa de dispersão de sementes é menos concentrada e que o vento somado às vibrações da aeronave podem interferir na vazão do equipamento. De forma complementar, foi elaborado na linguagem de programação *python* o treinamento de modelos de inteligência artificial para classificação de imagens aéreas e de forma automatizada encontrar regiões de solo exposto e georreferenciá-las e serem utilizados para criação de missões de voos para dispersão com drones. Foi possível classificar as imagens com alto nível de detalhamento e quantificar as áreas de solo exposto e feitas marcações dos centroides com suas coordenadas geográficas. Por fim, foi feita a modelagem matemática da dispersão aérea com drones por meio de equações que calculam parâmetros essenciais para o dimensionamento operacional da dispersão com drones.

Palavras-chave: Recuperação de áreas degradadas; semeadura aérea com drones; reflorestamento; machine learning.

ABSTRACT

The demand for recovery of degraded areas in Brazil is significant and technologies such as remotely piloted aircraft, popularly known as drones, can offer scalability and reduce risks to human life in field work. Although drones are gaining space in various segments of the reforestation industry, there is still a lack of parameter references to operationalize them in projects for the recovery of degraded areas. To fill this gap, studies of the behavior of the dispersion range as a function of height were carried out, with the objective of obtaining the dispersion pattern at different flight heights. The study demonstrated that at greater heights in relation to the ground, the range of seed dispersion is less concentrated and that the wind added to the vibrations of the aircraft can interfere with the flow of the equipment. In a complementary way, the training of artificial intelligence models was developed in the python programming language for classifying aerial images and in an automated way to find regions of exposed soil and georeference them and be used to create flight missions for dispersion with drones. It was possible to classify the images with a high level of detail and quantify the areas of exposed soil and markings of the centroids with their geographic coordinates. Finally, mathematical modeling of aerial dispersion with drones was carried out using equations that calculate essential parameters for the operational dimensioning of dispersion with drones..

Keywords: Degraded areas recovery; aerial seeding with drones; reforestation; machine learning.

1. INTRODUÇÃO

A Lei Federal 12.651/2012, conhecida popularmente como Código Florestal, protege as Áreas de Preservação Permanente e de Reserva Legal, considerados ecossistemas especialmente protegidos, por conter importante biodiversidade e serem potencialmente frágeis ao uso humano. Quando esses ambientes estão degradados e perdem total ou parcialmente sua capacidade de autoregeneração, e dificilmente se recuperam de forma plena, apenas pela regeneração natural. Nesse caso, precisam de algum tipo de intervenção humana para se restabelecer. Mesmo em áreas que foram exploradas e perturbadas, e que ainda possuem alta resiliência, ou seja, elevada capacidade de autorregeneração, há um certo grau de incerteza associado ao tempo de recuperação, em termos de densidade e uniformidade de recobrimento vegetal do solo (MOHAN, *et al.*, 2021).

O governo do Brasil firmou compromisso ambiental desafiador propondo-se a recuperar pelo menos 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030 (BRASIL, 2017). Esse processo passa por profissionais que elaboram e executam Planos de Recomposição de Área Degradada e Alterada - PRADA, que é o documento técnico orientador para a condução da recuperação de áreas degradadas.

Existem várias técnicas adotadas para recuperar uma área degradada, e sua escolha depende muito dos objetivos do projeto, prazos de adequação ambiental, grau de degradação, mão de obra, disponibilidade técnica de execução e recursos financeiros.

Dentre as várias técnicas utilizadas, as mais conhecidas são: a condução da regeneração natural, a semeadura direta e o plantio de mudas, a semeadura, particularmente, mostra-se como uma das alternativas mais econômicas sobretudo quando empregada no início da recuperação (MATTEI, 1993; FERREIRA *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2012).

Executar projetos de recuperação é um trabalho desafiador, pois, por exemplo, existem diversos fatores inerentes ao trabalho humano manual de dispersão de sementes em campo. A fadiga, a exposição à radiação solar, quedas, operações em áreas de deslizamentos, acidentes com animais peçonhentos, havendo a necessidade de treinar os profissionais envolvidos, e em alguns lugares essa mão de obra é escassa e onerosa (RODRIGUES, D. A *et al.*, 2018; DERSCH *et al.*, 2021).

Muitas vezes as áreas degradadas podem estar em locais de difícil acesso, em terrenos acidentados, como taludes de mineradoras ou próximas a grandes erosões e encostas de morros, o que impossibilita a semeadura mecanizada nesses ambientes, sendo necessário que pessoas

tenham que escalar essas encostas para depositar sementes no solo (MOHAN, *et al.*, 2021). O uso de tecnologias que automatizam os processos seria estratégico nesse cenário, tendo em vista não o ganho de tempo e precisão do trabalho, mas principalmente a redução de riscos à vida humana.

Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft* - RPA), conhecidas popularmente como drones, são uma solução estratégica para esse problema, pois podem executar diversas tarefas automatizadas, necessitando, na maioria das vezes, de uma ou duas pessoas em campo em posição fixa para realizar o controle dos equipamentos, mitigando a exposição de vidas humanas a acidentes graves.

Em muitos países os drones começaram a ser utilizados como ferramentas de apoio de ações em programas de proteção ambiental, dando suporte a novas iniciativas de conservação da biodiversidade e aprimorando as abordagens tradicionais (BARROS, *et al.*, 2019). Em projetos ambientais, de modo geral, sua aplicação já é bastante difundida auxiliando no mapeamento diagnósticos e monitoramento de áreas degradadas, uma vez que podem embarcar diversos tipos de sensores e atuadores.

Além destas aplicações, as RPAs podem ser utilizadas para lançar sementes de forma automatizada, sobrevoando em rotas pré-programadas cobrindo grandes áreas em pouco tempo (KOMAZAKI *et al.*, 2017). Em termos de deslocamento, a expectativa que os drones possam cobrir de 5 a 10 vezes mais áreas comparada ao trabalho de uma pessoa em solo, considerando que em cada voo o equipamento seja programado para retornar à base, para troca de baterias e que tenha um sistema de recarga eficiente, permitindo, operar muitas horas sem interrupções.

Se, por um lado, os drones atuais são projetados para serem de fácil manuseio ao executar missões planejadas de forma automática com intervenção humana mínima (LIU *et al.* 2016; REMONDINO, 2014), por outro, é imprescindível o operador tenha boa capacidade técnica em pilotagem, conhecimento sobre planejamento de missões, configurações de parâmetros, manutenções básicas e calibrações. Além disso, os pilotos deverão estar cientes das regulamentações necessárias do equipamento e licenças de voo para aplicação de sementes.

Estudos sobre aplicação de RPAs na semeadura aérea vem se popularizando como uma potencial técnica inovadora e eficiente para recuperar áreas degradadas, trazendo diversos benefícios para processos de restauração ecológica, sendo ideais para atuar em áreas de difícil acesso, minimizando trabalho manual e aumentando a precisão da aplicação de sementes (CASTRO, J. *et al.*, 2022; FORTES, E. P., 2017).

Ainda há poucos estudos científicos conclusivos acerca da eficiência desta técnica, bem como, protocolos possam ser replicáveis (MOHAN *et al.*, 2021). Em geral, as informações, sob

a formas de artigos, reportagens e materiais técnicos disponibilizadas na rede mundial de computadores, não fornecem parâmetros didáticos e replicáveis para dimensionamento de projetos de recuperação utilizando a semeadura aérea incluindo, por exemplo, altura de voo, quantidade de sementes por hectares, equipamentos e configurações utilizadas. Nesse sentido, a pesquisa propõe os seguintes objetivos:

Hipótese da pesquisa:

- ❖ Através do uso de RPAs pode-se operacionalizar o processo de dispersão de sementes como apoio na recuperação de Áreas Degradadas.

Objetivo geral:

- ❖ Desenvolver rotina metodológica para fornecer bases de automatização da semeadura aérea e estimar o grau de dispersão das sementes em solo, lançadas por meio de Aeronave Remotamente Pilotada.

Objetivo específicos:

- ❖ Iniciar a implementação de um conjunto de parâmetros básicos de voo, para utilização de Aeronave Remotamente Pilotada em projetos de recomposição vegetal de áreas degradadas
- ❖ Avaliar o padrão da dispersão espacial de sementes, em diferentes alturas do solo e indicar alguns parâmetros de voo de Aeronave Remotamente Pilotada, de acordo com a técnica de semeadura a ser adotada;
- ❖ Criar uma rotina na linguagem de programação *Python* para automatizar o processamento de imagens aéreas com modelos de Inteligência Artificial, como regra de decisão para obter locais em que as sementes serão dispersas;
- ❖ Fazer a modelagem matemática do processo da dispersão aérea de sementes para auxiliar no dimensionamento das operações de semeadura com drones.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ÁREA DEGRADADA

Uma área degradada pode ser entendida como um local que atingiu determinados níveis de impacto ambientais negativos, e que perdeu sua capacidade de regeneração natural que pode ser causada por diversos fatores, como a ação antrópica que representa a maior causa (CARPANEZZI *et al.*, 1990; ALMEIDA *et al.*, 2016; SEMA MT, 2016).

A urbanização e agricultura são elementos que contribuem para esse processo. A degradação de áreas especialmente protegidas pelo Código Florestal, causada pela supressão da vegetação nativa, pode trazer sérias consequências, tais como a intensificação cenários de extremas mudanças climáticas, além da redução da biodiversidade, da qualidade do ar, da água e do solo, reduzindo, desse modo, as manchas de cobertura vegetal nativa.

Quando a ocupação antrópica avança sobre florestas tropicais, como na Amazônia brasileira, por exemplo, mediante a supressão da vegetação nativa, se intensifica o contato direto do ser humano com a vida selvagem, podendo provocar disseminação de doenças zoonóticas (BRANCALION *et al.*, 2020).

Segundo Attanasio *et al.* (2006), a capacidade da autorregeneração do ecossistema está relacionada com as características de uso e ocupação da área, da qualidade do solo e existência de fragmentos florestais nas proximidades, que podem atuar como fontes naturais de propagação de sementes. Nas áreas degradadas, em razão da perda das camadas férteis superficiais, somado à exposição do solo a altas oscilações de temperatura causadas pela radiação solar, a regeneração das comunidades vegetais pode ocorrer muito lentamente, se forem conduzidas apenas de forma natural, sem o uso de insumos externos tais como preparo prévio do solo e adubação, uso de mudas ou sementes. Nesses casos, onde a resiliência é baixa, é necessário intervenções antrópicas visando apoiar na recuperação desses ambientes (ZHENG, *et al.*, 2005; SANTOS, 2010).

2.2 TÉCNICAS DE REVEGETAÇÃO

Existem diversas técnicas para recuperação de áreas degradadas e a escolha da mais apropriada varia de acordo com o contexto de cada local. Segundo Lens, E. R *et al* (2023), o processo de recuperação de uma área degradada parte inicialmente de um bom diagnóstico do

estado atual de degradação, mapeando fatores de pressões e ameaças sobre o ambiente, a urgência de recuperação e também da janela temporal que se espera obter os resultados esperados.

Deve-se buscar formas de reestruturar o ambiente com as condições ecológicas similares ao que era anteriormente por meio das diferentes técnicas (YOUNG, 2000). Sua escolha dependerá de uma série de conjunto de informações da área, tais como condições de solo, clima, fragmentos de vegetação próximos, assim como a escolha das espécies a serem utilizadas (RODRIGUES e GANDOLFI, 1998).

A técnica da condução da regeneração natural consiste no desenvolvimento da vegetação por práticas naturais e é bastante utilizada em etapas iniciais de projetos de recuperação, por ser pouco dispendiosa e não ter como requisitos a preparação do solo e o uso de maquinário (RODRIGUES *et al*, 2020). Trata-se de uma intervenção passiva, onde a vegetação se restabelece de forma natural a partir do banco de sementes existente no solo e da vegetação remanescente, por vezes, apenas o isolamento da área é um fator condicionante suficiente para o sucesso desta técnica. A rapidez da recuperação dependerá, principalmente, do grau de resiliência desta área (KAGEYAMA; GANDARA, 2004). Essa técnica tende a ser a forma de restauração mais barata, porém possui a desvantagem de ser normalmente um processo lento (NOVAIS, 2018).

A semeadura direta é uma técnica ativa de recuperação de áreas degradadas onde há a introdução de um consórcio de espécies pioneiras, que são de crescimento rápido e também de não pioneiras, que geralmente tem um crescimento lento e ciclo de vida mais longo (TOUMEY e KORSTIAN, 1967). Essa técnica pode ser empregada em área total, em linhas ou núcleos, dependendo dos objetivos do projeto. A semeadura pode ser utilizada em locais de solo exposto, onde há a necessidade de um rápido recobrimento do solo, visando a estabilizar a área e dar condições ao estabelecimentos das plântulas, e evitando o agravamento de processos erosivos (RODRIGUES *et al*, 2020), por exemplo, em encostas de morros, taludes de mineradoras, voçorocas profundas entre outras.

Para Isernhagen *et al* (2010), somente uma rápida cobertura não garante que o processo de sucessão ecológica secundária, podendo ser considerado como um catalisador das fases iniciais da recomposição vegetal. A semeadura direta é também estratégica nas fases subsequentes dos projetos de recuperação das áreas degradadas, onde é feito o enriquecimento vegetal de florestas com baixa diversidade de espécies (EMBRAPA, 2023).

Em termos de enriquecimento vegetal, a semeadura, no contexto das mudanças de espécies e grupos ecológicos no ecossistema em recuperação, tem potencial para promover o

aumento da biodiversidade existente, com a inserção de outras espécies de secundárias tardias a fim de reestabelecer os sistemas ecológicos florestais (KAGEYAMA; GANDARA, 2004).

Nos locais onde a resiliência do ecossistema é baixa ou quando não é possível realizar o plantio de sementes, seja falta de disponibilidade de espécies por questões sazonais, a técnica do plantio de mudas é frequentemente utilizada (RODRIGUES *et al.*, 2020). O plantio de mudas e o preparo adequado do solo, têm sido uma alternativa eficaz para acelerar a recuperação de áreas degradadas quando as condições ambientais são muito severas para a sobrevivência das sementes germinadas (LIMA, *et al.*, 2015). No entanto, é uma técnica que onera o orçamento dos projetos de recomposição vegetal de áreas degradadas.

Ainda que a probabilidade de sobrevivência das mudas e o consequente recobrimento do solo tendem a ser mais efetivos, comparado ao uso de sementes, a semeadura ainda é considerada umas das técnicas mais promissoras no processo de recuperação de áreas degradadas, especialmente quando o objetivo é reduzir os custos financeiros de implantação do projeto (SANTOS *et al.*, 2012).

Embora no Brasil o plantio de mudas seja amplamente utilizado nos PRADAs, o uso da técnica de semeadura em solos degradados é atrativo, sobretudo por conta da redução de custos de produção em viveiros (MARTINS, 2009; CAVA *et al.*, 2016; RAUPP *et al.*, 2020). Além disso, o uso da semeadura a lanço possui vantagens para recuperação, principalmente, em situações onde a regeneração natural e o plantio de mudas não podem ser executados devido às características do local ou pela dificuldade de acesso (BARNETT; BAKER, 1991; MATTEI, 1995).

A quantidade de indivíduos alvo por metro quadrado utilizada em projetos de recuperação de áreas degradadas é bastante variável, pois depende de uma série de fatores tais como tipo de vegetação, velocidade de cobrimento, tipo de solo, relevos e condições climáticas, que irão influenciar nos cálculos de semeadura ou no plantio de mudas.

Embrapa (2023) relata que nos PRADA a população de indivíduo comumente utilizada nos projetos pode variar entre 1.667 a 2.500 plantas por hectare, que podem ser dispostas em arranjos alternando linhas de plantio entre espécies de cobertura intensa e espécies sucessionais de maior diversidade.

Benini *et al* (2016) recomenda uma população em torno de 1100 indivíduos por hectare e enfatiza os benefícios do uso consorciado de espécies de adubo verde, que podem ser nativas ou exóticas não invasoras, nos PRADA, ajudando a promover um rápido e eficiente sombreamento já no primeiro ano controlando espécies de gramíneas invasoras. Segundo a Borges *et al* (2018), diversas espécies de vegetais podem ser utilizadas como adubo verde, no

entanto, espécies de leguminosas são as principais plantas utilizadas para essa finalidade pois possuem a capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, além disso a maioria são adaptadas as condições de baixa precipitação pluviométrica e apresentam sistema radicular profundo capaz de ciclar grandes quantidades de nutrientes.

2.3 AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS – RPA

No Brasil, os drones são legalmente denominados de Aeronaves Remotamente Pilotadas – RPAs, sendo que a regulamentação sobre o uso desses equipamentos no espaço aéreo, de forma recreativa ou profissional, fica a cargo do Departamento de Controle do Espaço Aéreo – DECEA, da Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC e Agência Nacional de Telecomunicações (SILVA, 2020).

Houve um crescimento expressivo em pesquisas militares para o uso desses veículos aéreos não tripulados (VANTs) (MOURA J.R., LORDSLEEM J.R., 2018). A partir da década de 80 as RPA começaram a ser amplamente utilizados em guerras, devido a diversas vantagens como a de não oferecer riscos à vida de tripulantes em combates e também por requerer um menor investimento em relação ao uso de uma aeronave tripulada.

Com o avanço da tecnologia em termos de portabilidade e automação, somado à redução de preços, esses equipamentos se popularizaram e tomaram espaço em variados segmentos de mercado: agricultura, pecuária, engenharia e meio ambiente (MELO, 2016). Atualmente, em função do incremento da capacidade de carga útil (*payload*) que estes equipamentos conseguem suportar, nota-se uma tendência na sua utilização também no setor de logística, para entrega de pequenas embalagens de medicamentos e no mercado de entregas de comida (KLIDZIO, A. M. *et al.*, 2020). Os drones são considerados uma tecnologia disruptiva e emergente, que estão causando mudanças estruturais em processos logísticos (RANA *et al.*, 2016) e por serem capazes de realizar tarefas de forma automática, sem a necessidade de intervenção humana, vem se tornando uma ferramenta atrativa para empresas e indústrias, por isso a regulamentação do seu uso é importante, a fim de garantir a segurança das pessoas envolvidas nesta atividade, assim como a preservação de bens e do meio ambiente.

2.4 REGULAMENTAÇÃO DA RPA NO BRASIL

No Brasil, a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2021) caracterizou o uso comercial de RPAs em três classes de acordo com o peso máximo de decolagem (incluindo acessórios, baterias, cargas adicionais e combustível quando houver).

- classe 1 - peso máximo de decolagem maior que 150 kg
- classe 2 - peso máximo de decolagem entre 25 e 150 kg
- classe 3 - peso máximo de decolagem entre 250 g e 25 kg

A ANAC (2021) ainda estabelece uma série de normas que regulamentam o uso de RPA. A seguir, as normas comuns aos RPAs das três classes:

- Ter no mínimo 18 anos de idade para pilotar ou auxiliar a operação como observador.
- Possuir seguro com cobertura de danos a terceiros.
- Fazer uma avaliação de risco operacional (IS-ANAC nº E94-003)
- Operar apenas em áreas distantes de terceiros (no mínimo 30 metros horizontais). Essa restrição está dispensada caso haja anuência das pessoas próximas à operação ou exista uma barreira mecânica capaz de isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação.
- Operar apenas um único sistema de RPA por vez.
- É possível trocar o piloto remoto em comando durante a operação.
- Não é permitido operar drones sob efeito de substâncias psicoativas e todos os operadores estão sujeitos às regras quanto ao uso de álcool e de drogas constantes do item 91.17 do RBAC - Regulamentos Brasileiros da Aviação Civil (RBAC 91).

Para operar aeronaves não tripuladas da Classe 3 (com peso máximo de decolagem maior que 250g e até 25 kg), além de seguir as regras da ANATEL e de utilização do espaço aéreo do DECEA, é necessário:

- Cadastrar cada equipamento no Sistema de Aeronaves não Tripuladas (SISANT) da ANAC disponível em: sistemas.anac.gov.br/sisant.
- Fixar a identificação (número obtido no processo de cadastramento) do equipamento em local visível na aeronave e com material não inflamável.
- Portar o comprovante do cadastro junto à ANAC, do seguro e da avaliação de risco e o manual de voo do equipamento. (ANAC, 2021)

Para operar Drones Classe 2 (peso máximo de decolagem maior que 25kg e até 150kg), além de seguir as normas da ANATEL e do DECEA, é necessário:

- Obter registro junto à ANAC e portar um Certificado de Aeronavegabilidade Especial RPA (CAER). Nesse caso, o proprietário deverá solicitar ao fabricante uma declaração de que aquele sistema de RPA específico está de acordo com projeto autorizado pela ANAC. Essa declaração deve ser apresentada no momento da solicitação de emissão do certificado. O sistema de RPA será previamente inspecionado pela ANAC para registro e emissão do CAER.
- Em situações específicas ou no caso de aeronaves com propósitos experimentais, o CAER pode ser substituído por um Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE) ou uma Autorização Especial de Voo (AEV).

- Realizar todos os procedimentos específicos recomendados pelo fabricante no manual de manutenção e registrá-los em cadernetas apropriadas. A manutenção, a manutenção preventiva, os reparos ou as alterações e as aprovações para o retorno ao serviço devem ser feitas pelo fabricante ou por organização de manutenção credenciada pelo fabricante ou, ainda, por pessoa qualificada e devidamente treinada pelo fabricante ou instituição credenciada pelo fabricante.
- Possuir e portar licença e habilitação emitidos pela ANAC, bem como Certificado Médico Aeronáutico (CMA) de 1ª, 2ª ou 5ª classe concedidos pela ANAC ou de 3ª classe expedido pelo Comando da Aeronáutica (ANAC, 2021)

Para operar Drones Classe 1 (peso máximo de decolagem maior que 150 kg), além de seguir as normas da ANATEL e do DECEA, é necessário

- Possuir e portar licença e habilitação emitidos pela ANAC, bem como Certificado Médico Aeronáutico (CMA) de 1ª, 2ª ou 5ª classe concedidos pela ANAC ou de 3ª classe expedido pelo Comando da Aeronáutica.
- Obter registro junto à ANAC e portar um Certificado de Aeronavegabilidade padrão ou restrito. Nesse caso, o proprietário deverá seguir todos os procedimentos estabelecidos no RBAC nº 21. **IMPORTANTE!** Em situações específicas ou no caso de aeronaves com propósitos experimentais, o CA padrão ou restrito pode ser substituído por um Certificado de Autorização de Voo Experimental (CAVE) ou uma Autorização Especial de Voo (AEV).
- Executar uma Inspeção Anual de Manutenção (IAM) no sistema de RPA a cada 12 meses. O proprietário ou operador deve apresentar à ANAC uma Declaração de Inspeção Anual de Manutenção (DIAM) para o referido sistema de RPA, atestando sua condição de aeronavegabilidade. A manutenção, a manutenção preventiva, os reparos ou as alterações devem ser executados como estabelecido nos requisitos aplicáveis Subparte G do RBACE nº 94/2017 e em outras regulamentações aplicáveis, incluindo o RBAC nº 43 (ANAC, 2021).

2.5 REGULAMENTAÇÃO DAS RPAS AGRÍCOLAS

Recentemente, o Ministério da Agricultura e Abastecimento – MAPA regulamentou o uso de RPA em aplicações agrícolas. A portaria nº 298, de 22 de setembro de 2021, estabelece regras para operações de aeronaves remotamente pilotadas destinadas a aplicações de agrotóxicos, fertilizantes, corretivos e sementes. Além de obedecer às normas básicas da ANAC e DECEA, o piloto remoto deve realizar o curso de aplicação aeroagrícola remota – CAAR e adquirir seu registro junto ao MAPA.

O piloto deve garantir seguir todas as normas previstas na portaria, dentre elas, manter a regularização junto à ANAC, não realizar aplicações (sementes, fertilizantes, corretivos, agrotóxicos ou adjuvantes) em áreas situadas a uma distância mínima de vinte metros de cidades, pessoas, animais, reserva legal, áreas de preservação permanente (APP), locais de

abastecimento além de outras áreas ambientais com largura mínima de proteção estabelecida em legislação específica.

O operador de RPA deve manter todos registros de aplicações tais como data hora, local, condições meteorológicas locais, modelo de aeronave, tipo de insumo aplicado entre outras. Diante disso, entende-se que os critérios de segurança para os usos tanto recreativo e comercial de drones aumentam conforme o grau de periculosidade da atividade. Logo, para realizar dispersão aérea de sementes com finalidade agrícola ou ambiental deve-se estar de acordo não só com a regulamentações dos órgãos de controle aéreo (ANAC e DECEA) mas também com regulamentações do MAPA.

2.6 DRONES E MEIO AMBIENTE

Os avanços recentes da tecnologia ampliaram a utilização de drones na restauração ecológica, sobretudo em tarefas que podem ser automatizadas (CORTINA *et al.*, 2017), além do custo de aquisição dessas aeronaves, que são significativamente inferiores às de uma aeronave convencional tripulada. Os drones criaram novas possibilidades, inclusive, para gestão de recursos naturais. Até recentemente, seu uso em trabalhos ambientais se limitava ao reconhecimento e monitoramento de um alvo (BAENA *et al.*, 2018; BELMONTE *et al.*, 2019; SANKEY *et al.*, 2017), mas esses equipamentos passaram a ser utilizados para transporte e lançamento de materiais diversos, por exemplo, sementes e insumos agrícolas, fazendo isso de forma rápida e precisa.

As sementes podem ser dispersadas em locais específicos, previamente mapeados, e os drones multirotores tem a capacidade de realizar voos lentos e altamente manobráveis, por isso estão se tornando cada vez mais capazes de fazer a semeadura direta com uma alta precisão em paisagens complexas (AGHAI M. e MANTEUFFEL-ROSS T., 2020). Matthew Aghai (2020) em seu estudo, apresenta a utilização de "enxames" de Drones em conjunto com tecnologias de sementes projetadas para melhorar a eficiência reduzindo a intervenção humana e de como podem ser utilizados em diferentes tipos de terrenos. Elliott (2016), explora o potencial do drone como uma tecnologia emergente estratégica para apoiar a regeneração natural por meio do enriquecimento de espécies e auxiliando além de auxiliar no monitoramento.

Uma RPA possui um sistema de controle de navegação (piloto automático) que auxiliam os pilotos a realizarem missões planejadas de forma segura, sem a necessidade de grandes habilidades de pilotagem. O piloto automático é um dispositivo que controla uma aeronave em

um voo padrão pré-programado sem a intervenção humana e tem como função controlar a altitude, direção e velocidade da aeronave em uma rota estabelecida que combina as informações recebidas do sistema de navegação com os dados recebidos dos sensores e dos sistemas de referência de altitude e direção para gerar comandos de manobra (NERIS *et al.*, 2003). Por isso, a utilização de RPAs por meio de planos automatizados podem reduzir falhas nas operações, oferecer maior agilidade e precisão e principalmente, uma maior segurança para os operadores de campo (ELLIOTT, 2016).

Nos últimos anos, o uso de RPAs vem tornando-se amplamente utilizado por conta de sua disponibilidade, com um custo benefício acessível, quando comparadas ao de uma aeronave convencional (tripulada), com a possibilidade de integração de outros sistemas embarcados, por exemplo, câmeras multiespectrais, sensor Lidar, entre outros, atendendo inúmeras necessidades de proprietários (MOHAN *et al.*, 2017). Segundo Elliot (2016), os drones podem ser utilizados para semeadura aérea de sementes como forma complementar da revegetação natural ou artificial de acordo com padrão esperado. Para Castro *et al.* (2021), o grande potencial da semeadura com drones é a capacidade entregar sementes precisamente em regiões pontuais de interesse, identificando as coordenadas geográficas que possuam microhabitats estratégicos que ofereçam maiores chances de germinação e estabelecimento das plântulas. Isso maximiza a eficiência da semeadura e reduz os custos operacionais.

É importante destacar que, a semeadura aérea com drones pode dar escalabilidade à recomposição vegetal de áreas degradadas, incluindo segurança operacional, mas a germinação das sementes dependerá das tecnologias inerentes ao próprio insumo, tais como seleção de sementes, forma de armazenamento, espécies e genótipos apropriados (SOLERA, 2022). Os drones atuam apenas como vetores neste processo.

Independentemente do método de semeadura utilizado, seja manual ou com drones, deve-se considerar que, uma vez colocadas no campo, as sementes, e os novos indivíduos que elas darão origem, estão sujeitas aos perigos bióticos e abióticos que podem reduzir fortemente o potencial de regeneração vegetal da área, sem contar que nesse processo, uma parte das sementes podem cair em locais que inviabilizam sua germinação, por exemplo sobre palhadas ou rochas. Apesar da semeadura com drones trazer múltiplas vantagens para a restauração florestal, é necessária uma avaliação focada na resolução do problema final e não da técnica utilizada (CASTRO, J. *et al.*, 2022).

Segundo (ELLIOTT, 2016) essa tecnologia pode ser utilizada de diversas maneiras em projetos de recuperação ambiental: avaliações da área, semeadura em área total de espécies vegetais, manutenção e enriquecimento de espécies de cobertura estratégicas à biodiversidade.

Todavia, a semeadura aérea utilizando drones não substitui as técnicas de recuperação convencional, mas serve como uma ferramenta complementar das ações de recuperação, principalmente em locais onde há pouca mão de obra disponível ou onde a paisagem é particularmente desafiadora (AGHAI e MANTEUFFEL-ROSS, 2020). Desse modo, as RPAs podem oferecer medidas alternativas para o dimensionamento de projetos de recuperação de áreas degradadas com uma maior segurança, tendo em vista um menor requerimento de força de trabalho humana (AMADOR-JIMÉNEZ *et al.*, 2020; BRANCALION *et al.*, 2020).

Existem diversos modelos de drones agrícolas no mercado que suportam cargas de 10, 20 e até 40 quilos como é o caso do modelo Agras T40 da empresa DJI. De acordo com as regras de Consolidação das Leis do Trabalho – CLT, a capacidade de carga máxima permitida a uma pessoa é de 60 quilos para homens e 25 quilos para mulheres, mas que pode ser menor dependendo das particularidades ergonômicas de cada atividade, considerando movimentos repetitivos, agachamentos ou torções. Isso significa que, em termos de carga útil, os drones podem em alguns momentos, se equiparar um serviço manual de uma pessoa (BRASIL, 2017). Por outro lado, os custos de aquisição destes equipamentos são na ordem de R\$100.000,00 que pode representar uma barreira inicial devido custo considerável.

Em escala global há cerca de 350 milhões de hectares de áreas degradadas que devem ser restaurados até 2030 (BONN-CHALLENGE, 2023). Para atingir essa meta ambiciosa é imprescindível inovar com tecnologias escaláveis e econômicas a fim de conseguir não só a restauração dessas áreas degradadas, como também seguir com um monitoramento adequado (ALMEIDA, D.R.A., 2019).

A Universidade Federal de Rondonópolis (UFR), possui um histórico de projetos de pesquisa e extensão de mais de 10 anos, visando a criação de técnicas e dispositivos inovadores para aperfeiçoar projetos de recomposição de área degradada e alterada.

Santos (2013), criou o protótipo do software “GePRAD” para monitorar rotinas de elaboração e gestão de um PRADA, a partir de um sistema pautado no ciclo PDCA. Um software para dispositivos móveis foi criado em 2019 baseado na Avaliação de Pressões e Ameaças (IRPA). Anteriormente outros softwares foram gerados, como o programa de apoio a gestão de projetos de recuperação de áreas degradadas avaliando indicadores de pressões e ameaças (RESMINI *et al.*, 2018).

Em termos de patentes, pesquisadores da UFR e outros colaboradores desenvolveram um dispositivo físico, para que os profissionais em campo, que permite realizar um diagnóstico de uma área degradada (PARANHOS-FILHO *et al.*, 2017). Silva *et al.* (2020) patentearam uma

técnica de recuperação de áreas degradadas por meio da dispersão de sementes em cápsulas biodegradáveis com aeronave remotamente pilotada.

3. MATERIAL E MÉTODO

O procedimento metodológico foi organizado da seguinte forma:

- 1- estudo de bancada para obtenção de parâmetros de vazão do equipamento e curva característica do dispersor;
- 2- avaliação da dispersão aérea de sementes com drones em diferentes alturas, obtendo a faixa de dispersão das sementes no solo;
- 3- treinamento de modelos de inteligência artificial para classificação de imagens aéreas e detecção de solo exposto para dispersão de sementes;
- 4- modelagem matemática de parâmetros operacionais da semeadura com drones, em função da altura em relação ao solo.

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

3.1.1 RPA

Utilizou-se uma aeronave remotamente pilotada, do tipo multirotor, hexacóptero modelo X800 (Figura 1). Trata-se de uma plataforma multifunção, que pode ser utilizada tanto para imageamento aéreo, embarcando máquina fotográfica, como para a dispersão de sólidos, por meio de dispositivos de acondicionamento e soltura de sementes ou cápsulas de sementes. O X800 é uma plataforma de código aberto compatível com *Software Mission Planner*. A seguir, a Tabela 1 apresenta a descrição técnica detalhada do equipamento informada pela empresa fabricante:

Tabela 1 Descrição técnica da RPA modelo X800. Fonte: www.xflytecnologia.com.br/x800bio

Modelo: X800 BIO
Hexacóptero com controle manual e voo totalmente programável
Autonomia aproximada de 30 minutos
Velocidade: programável até 60 km/h
Capacidade de carga: 1500 g
Área necessária para decolagem: Círculo com 1 metro de raio
Peso total de decolagem: 5kg
Controladora: Pixhawk com GPS (Software opensource)
Telemetria: 915MHz

Distância entre eixos: 800 mm

Circunferência total: 1200 mm

Alimentação: 1 bateria 16000mAh

Tempo de recarga da bateria: 1 hora

Tempo de preparação para decolagem: 10 minutos com programação de voo



Figura 1- RPA Hexacóptero modelo X800 com sistema de dispersão embarcado. Fonte: autor.

3.1.2 Dispenser de sementes

É um equipamento projetado para ser embarcado no X800, trata-se de um dispersor de agente biológico a granel, adaptado para a soltura de sementes com até 1cm de diâmetro. Construído por meio de impressão 3D de material ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno) e fibra de carbono, sendo de fácil instalação e recarga.

Esse dispersor possui interface com a placa controladora, que serve de alimentação do servo motor e regulagem da velocidade de giro, que pode ser ajustável, alterando os parâmetros da placa controladora por meio do software Mission Planner. Segundo o fabricante, seu reservatório possui uma capacidade de 450 ml. Em sua superfície interna possui uma rosca helicoidal, que a partir de acionamento da placa controladora, aciona-se o motor que faz o reservatório girar e empurrar as sementes para fora, por meio de um bocal de escoamento circular de 2 centímetros de diâmetro, tornando o volume de saída, praticamente constante (Figura 2).

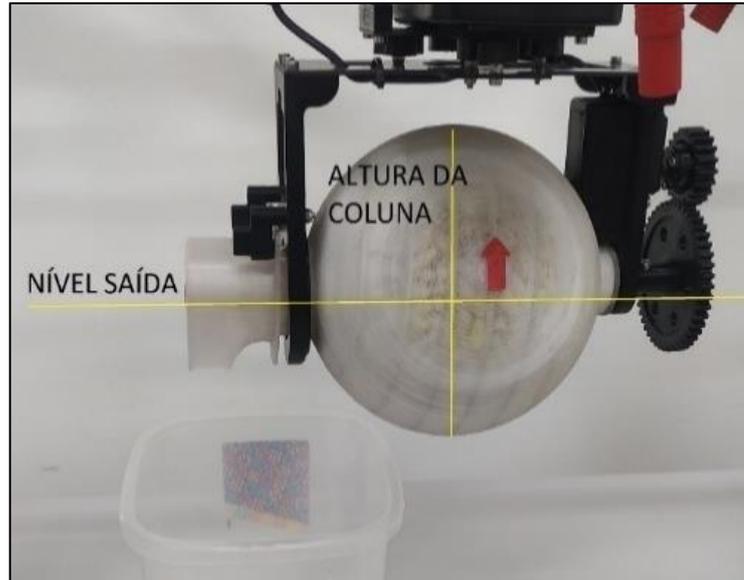


Figura 2- Dispenser de sementes. Fonte: autoria própria

3.1.3 Sementes de Feijão branco

Utilizou-se para os testes de dispersão, sementes de feijão branco (*Phaseolus vulgaris*), pois é uma leguminosa útil para fertilidade do solo, uma vez que possui a capacidade de simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio (GILLER, 2001), e possui potencial fitorremediador do solo (NAWAZ *et al.*, 2020). Essas características são estratégicas para recuperação de solos degradados.

Para um experimento de detecção de dispersão de sementes no solo, as mesmas precisariam ser de fácil visualização, para identificação visual e por meio de imagens áreas. A cor clara das sementes serviu para facilitar a sua localização e contagem durante os testes, sem a necessidade de fazer qualquer alteração nas propriedades naturais do insumo, tais como tingimento adicional. Em bancada, as sementes foram previamente pesadas com uma balança de precisão 0,1 gramas apresentando resultado de peso de 1000 sementes igual a 500 gramas.

3.2 EXPERIMENTO PILOTO COM DISPERSOR

Inicialmente foi feito um estudo piloto com o dispersor, para dimensionar o comportamento da vazão do equipamento, em função do tempo e posteriormente uso em campo. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Geotecnologias do Núcleo de Produção

e Conservação do Cerrado (Nupec), da Universidade Federal de Rondonópolis, no estado do Mato Grosso. Inicialmente o reservatório foi totalmente preenchido com as sementes com auxílio de uma balança de precisão 0.1 g, verificou-se uma carga útil de massa com aproximadamente um 1000 gramas, conforme mostra a Figura 3.



Figura 3 Procedimento de obtenção da capacidade máxima do dispensador com sementes de feijão. (a) peso do equipamento vazio e (b) peso do equipamento totalmente preenchido. Fonte: autor.

Para realizar as configurações dos parâmetros de velocidade foi utilizado o software *Mission Planner* versão 1.3.75, que é gratuito e de código aberto. Este software fornece uma interface gráfica capaz de configurar parâmetros da RPA que possui piloto automático da linha *Ardupilot* (ARDUPILOT, 2020). Por meio dele também é possível realizar o monitoramento e controle das ações da aeronave em tempo real durante o voo. O software possui uma interface de comunicação baseada no protocolo de MAVLink, que se dá através do sistema de telemetria (ANDRADE, 2012).

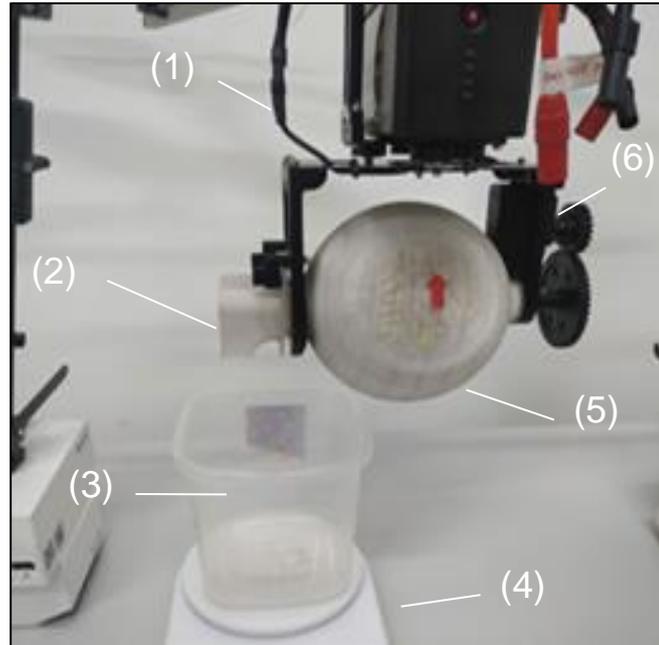
Na sequência, o dispenser foi conectado na saída PWM 12 da placa controladora e feito a configuração de velocidade do servo, que determina a de vazão das sementes do dispenser para seu alvo. Definiu-se os parâmetros 1500 e 1900 para os sinais LOW e HIGH (Figura 4). Estes parâmetros foram definidos com base em tentativa e erro, e chegou-se a um valor de velocidade mínima que fornecesse vazão suficiente para esvaziar o reservatório por volta de 9 a 10 minutos, que é o tempo médio de uma missão desta aeronave com carga considerando o tempo adicional de retorno. Determinar esse parâmetro de vazão ótima é essencial para se fazer um bom planejamento da semeadura independente da técnica, pois implicará no dimensionamento de outros parâmetros da aeronave, por exemplo, altura e velocidade. Se a

finalidade for realizar plantio em linhas a relação altura-velocidade-vazão irá definir a taxa de cobertura esperada, enquanto que se for semear em núcleos, a altura e o tempo de dispersão sobre o alvo será considerado.



Figura 4 - Interface do Software Mission Planner durante o processo de configuração dos parâmetros de velocidade do servo motor. Fonte: autor.

A determinação da vazão foi realizada da seguinte forma: um coletor foi posicionado sobre uma balança na saída do dispersor de sementes para que pudesse registrar a variação da massa liberada em função do tempo (Figura 5). Um cronômetro auxiliar foi utilizado. A coleta de dados foi realizada em um intervalo de um minuto, para assim registrar as vazões instantâneas (em gramas por minuto) do equipamento e também o tempo de descarga total do reservatório. Ao todo, neste procedimento foram realizadas 10 repetições totalizando 100 coletas amostrais. Os dados foram analisados utilizando planilha eletrônica Excel.



Figur 5 - Procedimento de determinação da vazão do dispenser de sementes. A balança posicionada sobre a balança registrando as variações de peso a cada minuto. (1) cabo de alimentação e sinal da placa controladora, (2) saída do dispenser de sementes, (3) coletor, (4) balança de precisão, (5) reservatório do dispenser com sementes. Fonte: autor.

3.3 EXPERIMENTO DE SEMEADURA AÉREA NO CAMPO

O experimento de campo foi realizado na área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis – UFR, latitude 16°27'41.75" sul e longitude 54°34'52.55" oeste, altitude de 292 metros. Possui um solo do tipo Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013). O local do estudo (Figura 6) foi previamente preparado com uma gradagem e posteriormente uma capina manual, para que a área apresentasse solo exposto sem a presença de gramíneas e palhada. Foi aberta uma pista para os testes de 10 x 17 metros onde foi feita novamente uma capina manual para a retirada da palhada remanescente e da vegetação que rebrotou.



Figura 6 - Demarcação do local de realização do experimento de campo. Área experimental da Universidade Federal de Rondonópolis - UFR. Fonte: Google Earth Pro, 2022

A RPA dispersora utilizada nesta etapa foi o mesmo modelo utilizado anteriormente nos testes de bancada, e embarcado com o dispenser de sementes. O controle da aeronave durante os voos se deu por meio do rádio controle de frequência de operação de 2,4GHz e também por uma estação de controle terrestre (notebook) através da telemetria na frequência 433MHz. Os voos foram realizados abaixo de 30 metros, na categoria *VLOS (Visual Line Of Sight Operation)* na qual o piloto mantém a linha de visada direta do equipamento sem auxílio de observadores auxiliares, lentes ou outros equipamentos (DECEA, 2020).

Devido a particularidade do trabalho e pela dificuldade de se encontrar trabalhos que pudesse auxiliar na avaliação do padrão com que as sementes caem no chão em função da altura, uma metodologia alternativa foi proposta. Foi construída uma pista de testes utilizando barbantes de cor branca onde foram dispostos em círculos concêntricos de raios 2, 3, 4 e 5 metros, de forma que pudesse servir como “pista alvo” para o drone dispersor. Isso possibilitou avaliar a influência da altura de voo no espalhamento das sementes em solo, para que posteriormente seja possível recomendar parâmetros adequados para situações reais de trabalho de semeadura aérea com drones. O desenho experimental pode ser visto na Figura 7.

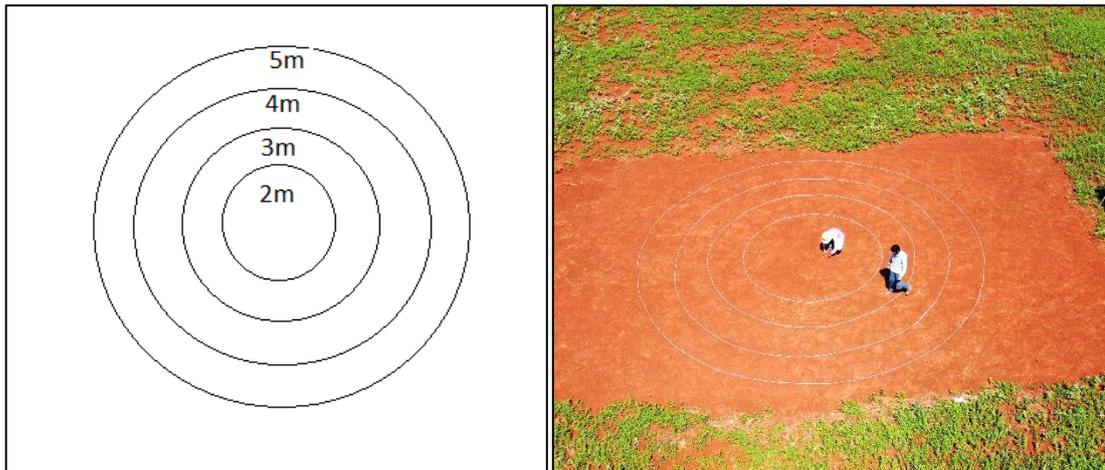


Figura 7 - Desenho experimental para estudo do padrão de espalhamento das sementes em solo após serem liberadas por RPA. Os barbantes foram dispostos em raios de 2,3,4 e 5 metros. Fonte: autor

A variável altura da RPA em relação ao solo foi avaliada em 5 níveis: 4, 8, 12, 16 e 20 metros, com três repetições em cada tratamento, totalizando 15 voos. O dispenser de sementes foi preenchido com 400 gramas durante todas as repetições.

Como forma de controle dos tratamentos, foi mantido um padrão inicial de posicionamento da aeronave, sempre ao centro da pista de testes e apontando na mesma direção da visada do piloto. O modo de voo utilizado foi o LOITER em que utilizada uma posição fixada dada pelo receptor GPS do drone. Esse modo de voo oferece uma boa estabilização e permite que a aeronave paire no ar mantendo sua posição constante nos 3 eixos inerciais, e qualquer interferência a controladora o corrige em tempo real seu posicionamento (ARDUPILOT, 2022). Ao conectar à telemetria, as principais informações de parâmetros de voo são monitoradas em tempo real. Isso permitiu monitorar a altura do equipamento no tratamentos estabelecidos.

O procedimento operacional padrão utilizado em todos os voos foi de: (i) levantar voo no modo manual até uma altitude de 3 metros utilizando rádio controle, (ii) com ajuda de um observador auxiliar, posicionado ortogonalmente à linha de visada do piloto, centralizar a aeronave de forma garantir que a aeronave suba verticalmente, até a altura do tratamento, alinhada ao centro da pista de testes e finalmente atingindo a altura estabelecida (iii) deixar a aeronave no modo aeronave pairando (iv) e por meio da estação de controle utilizando a comunicação via telemetria realizar o acionamento do dispensor de sementes, em vazão constante, por exatamente um minuto (Figura 8). Um cronômetro auxiliou nesta tarefa. Durante o momento de liberação das sementes foi aferida as velocidades máximas e mínimas em metros

por segundo (m/s) e também da temperatura do ar em graus Celsius (°C) utilizando um anemômetro digital, modelo GM816, a uma altura de 2 metros do solo.



Figura 8 - Procedimento de voo. (a) posicionamento inicial da aeronave ao centro da pista. (b) a aeronave pairando acima do solo durante o alinhamento com apoio de um observador auxiliar posicionado ortogonalmente à linha de visada do piloto. Fonte: autor

Ao encerrar o tempo de um minuto, desliga-se o dispersor da aeronave, e pelo rádio controle a RPA foi pousada em solo, em um outro local distante do ponto de decolagem para não interferir no posicionamento das sementes, devido ao arrasto causado pelas hélices do equipamento. Ao final de todas as repetições foi feita a reposição das sementes do dispenser com auxílio de uma balança de precisão até completar os 400 gramas. Isso serviu para garantir uma carga inicial constante em cada voo.

Em seguida foi realizada a contagem manual das sementes em cada raio do alvo separadamente, de forma analisar a precisão e o grau de espalhamento das sementes em cada altura. Optou-se por iniciar o experimento com o tratamento de maior altitude (de 20 metros) por questões de segurança operacional e ir diminuindo sucessivamente até o último tratamento (de 4 metros). Em cada tratamento, desde o preenchimento do dispenser à contagem das

sementes, levaram um tempo em torno de 15 minutos. Os dados foram então organizados em uma planilha eletrônica em formato de tabelas, em seguida foram submetidos à análise de variância pelo teste de F com 5% de probabilidade a fim de verificar uma possível influência na vazão do equipamento em função da altura e padrão de espalhamento. Após a verificação dos efeitos significativos dos tratamentos das alturas no equipamento, foi realizado teste Tukey a 5% de probabilidade para desdobramento das análises utilizando o Software Excel. Os dados de velocidade do vento, temperatura e vazão foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para avaliar a distribuição normal com 95% de probabilidade. Em seguida, as variáveis foram submetidas ao teste pareado de correlação de Spearman para verificar a correlação entre as variáveis contínuas. O nível de significância foi estabelecido em $p < 0,05$ para determinar se havia significância estatística entre as variáveis. A biblioteca de computação científica Scipy foi utilizada para esses cálculos.

3.4 AUTOMATIZANDO A CLASSIFICAÇÃO DE COBERTURA DE SOLO COM USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Nesta etapa do trabalho será apresentado uma rotina que automatiza o processamento de imagens utilizando modelos de *Machine Learning*. O objetivo final é obter a classificação da cobertura de solo para estabelecer zonas de manejo de recuperação de áreas degradadas. Além disso, os locais de solo exposto serão quantificados e georreferenciados com suas respectivas coordenadas geográficas, para posterior geração de planos de voos personalizados, para dispersar sementes pontualmente nestes locais utilizando drones. O fluxo resumido está apresentado a seguir (Figura 9):

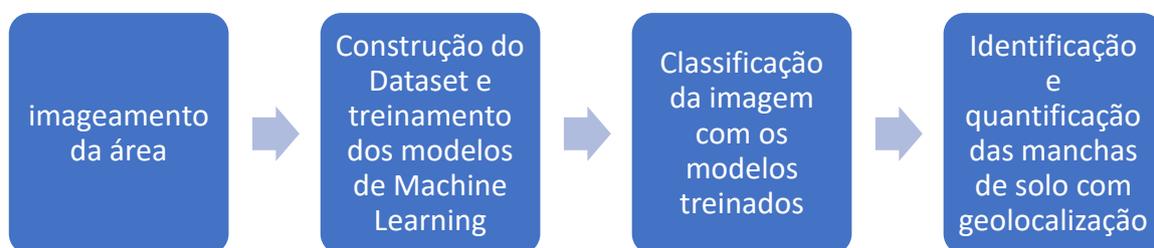


Figura 9 - Fluxograma geral de trabalho. Fonte: autor.

3.4.1 Construção do dataset para treinamento de modelos de Inteligência Artificial

Na área experimental da Universidade foram feitas abertas pequenas clareiras por meio da capina manual a fim de simular pontos de degradação. Esta área havia sido gradeada em agosto de 2021 e devido ao período de chuva nos meses de janeiro houve uma rebrota da vegetação. Em alguns pontos possuía uma vegetação rasteira rala enquanto em outros a presença da palhada seca remanescente da gradagem. Em alguns locais houve a rebrota mais rápida de capim, portanto, um cobrimento de solo mais denso. Visualmente era possível distinguir a palhada, as clareiras de solo exposto, vegetação rasteira e capim o denso. Foi feito nesta área o imageamento com uma RPA modelo Phantom 4 Pro da empresa DJI.

O voo foi realizado no dia 5 maio de 2022 por volta das 14 horas com altitude de 30 metros e sobreposição frontal e lateral de 80%. Ao total foram obtidos 98 arquivos de imagens no formato JPEG, que posteriormente foram processadas, por meio do serviço em nuvem da *Drone Deploy*, para obtenção do mosaico de imagens aéreas do tipo RGB, da área total georreferenciada, com Sistema de Referência de Coordenadas: UTM, Zona 21, Datum Sirgas 2000. Foram selecionadas algumas imagens para avaliação visual e identificado basicamente 3 tipos de cobertura de solo: vegetação nas cores verde, palhada seca com cores de amarelo ao branco e solo exposto com predominância da cor vermelha devido ao tipo de solo local (latossolo). Dentro da classe vegetação ainda foi identificado manchas de vegetação mais rasteira, com tonalidades de verde mais claro e também regiões com capim mais denso com tonalidades de verde escuro que se confundia com sombras em alguns pontos, conforme Figura 10.



Figura 10 - Exemplos de locais que foram coletadas as amostras para construção do dataset. Fonte: autor

Foram estabelecidas 5 classes alvo para construção do dataset de base: solo exposto, palhada, vegetação rasteira, vegetação alta, sombra. O critério de escolhas das classes teve como base, possíveis indicadores de desempenho da recomposição vegetal de uma área degradada.

Principalmente em área do bioma Cerrado, o solo exposto principal é um importante indicador, pois sua presença aliada à declividade do terreno, torna o local susceptível à erosão, nos períodos de chuva, normalmente entre os meses de outubro a março. Na sequência tem-se a presença e quantidade de palha seca que, representa uma ameaça no período seco, normalmente entre os meses de maio a setembro, principalmente na etapa da recomposição vegetal em que as mudas estão ainda em fase de estabelecimento, pois o material seco pode ser combustível para focos de queimadas.

A outra classe que complementa o acompanhamento da recuperação desta área que inicialmente é a vegetação de porte herbácea e arbustiva, que devido ao seu crescimento vai adquirindo tonalidades verde mais escuro com a presença de sombras nas bordas.

Houve a coleta dos valores RGB de cada pixel das amostras de imagens, com valores de 0 a 255, sendo rotulado as respectivas classes de cobertura, de modo obter uma matriz em que as amostras estivessem dispostas nas linhas e as características e classe nas colunas, no seguinte formato:

<i>Amostra</i>	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>	<i>Classe</i>
<i>1</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>Classe 1</i>
<i>2</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>Classe 1</i>
<i>3</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>Classe 3</i>
<i>.</i>	<i>...</i>	<i>...</i>	<i>...</i>	<i>...</i>
<i>.</i>	<i>...</i>	<i>...</i>	<i>...</i>	<i>...</i>
<i>N</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>valor</i>	<i>Classe n</i>

Onde o valor de classes corresponde a valores de 1 a 5 foram atribuídas da seguinte maneira:

1 – solo

2 – vegetação rasteira

3 – palhada

4 – vegetação alta (densa)

5 – regiões de sombra

Em seguida a base foi organizada em um arquivo no formato .csv com aproximadamente 1000 amostras de cada classe , totalizando 5 mil dados rotulados que foram

utilizados para treinar 3 modelos de classificação supervisionada: *RandomForest (RF)*, *K-Nearest Neighbors (KNN)* e *Regressão logística (RL)*.

Objetivou-se uma base relativamente balanceada para treinamento e validação dos modelos. O treinamento foi realizado utilizando processamento em nuvem no ambiente *Google Colaboratory* na versão gratuita com uma máquina de capacidade 12 Gigas de memória RAM. Os Scripts foram feitos na linguagem de programação *Python*, versão 3.8.10. Foi utilizado a biblioteca *Scikit Learning* para treinamento dos modelos de classificação.

Para organização e manipulação dos dados tabulares em formato de *DataFrames* foi utilizado a biblioteca *Pandas*. Para otimização dos cálculos de matrizes foi utilizado a biblioteca de computação científica *Numpy*. O mesmo conjunto de dados foi utilizado nos três modelos treinados.

Inicialmente, o conjunto de dados foi carregado em uma variável e realizado o embaralhamento com 100 % das linhas com o método *sample (frac=1)*. Em seguida foi feita a separação dos dados na proporção de 80% para treino e 20% para teste com *random state*, padrão igual a 90 em todos os treinamentos e testes que seguiram.

No treinamento do modelo *Random Forest* foi utilizado número de estimadores igual a 10. Para treinamento do modelo *KNN*, foi utilizado o parâmetro de *K* vizinhos igual a 10. Outros valores foram testados que deram melhores resultados em termos de precisão, porém sobrecarregou a memória disponível para processamento ocasionando em reinicialização do ambiente. E por fim, para o treinamento do Modelo *Regressão logística* utilizou-se o método de otimização padrão “*lbfgs*” e adaptação para classificação multiclasse utilizando parâmetro *multiclass* igual a “*ovr*”. As métricas de teste dos modelos foram obtidas a partir dos métodos *classification report*, *confusion matrix* e *accuracy score*. Um vídeo tutorial com os passos desta rotina foi elaborado para ser disponibilizado para interessados.

3.4.2 Aplicação dos modelos treinados para classificar imagens de Drone

A partir dos modelos treinamento ocorreu a classificação do mosaico da área imageada. Foi utilizado a biblioteca de visão computacional *opencv* e *numpy* para manipulação das imagens em forma de matrizes. O mosaico obtido no formato *Geotiff* foi carregado em uma variável por meio da *opencv* e obtido suas dimensões, com 14.571 linhas por 8599 colunas. Cada pixel da imagem equivale a um *array* de 3 dimensões com os valores [R,G,B] variando de 0 a 255 e estão organizados em listas de *arrays* empilhados formando as linhas que por sua vez forma toda a imagem através de uma grande matriz , como pode ser visto a seguir:

```
[
[[Ri,j, Gi,j, Bi,j], [Ri,j, Gi,j, Bi,j], ..., ..., [Ri,j, Gi,j, Bi,j],
[[Ri,j, Gi,j, Bi,j], [Ri,j, Gi,j, Bi,j], ..., ..., [Ri,j, Gi,j, Bi,j],
...
...
[[Ri,j, Gi,j, Bi,j], [Ri,j, Gi,j, Bi,j], ..., [Rin,jn, Gin,jn, Bin,jn]]
]
```

O método *reshape* foi utilizado para redimensionar a matriz original para o mesmo formato utilizados no treinamento dos modelos de classificação. A matriz redimensionada passou a ter uma dimensão de 125.296.029 linhas por 3 colunas. Para minimizar os custos computacionais com o processamento dessa enorme quantidade de linhas, foi feito o fatiamento desta matriz em 10 sub matrizes que foram os *inputs* dos modelos e processadas uma a uma gerando mascaras de saída com as classes preditas.

Isso gerou um incremento considerável de tempo de processamento, porém evitou o estouro de memória da máquina virtual. Posteriormente, todas as matrizes com as classes preditas foram concatenadas e redimensionada para mesma dimensão da matriz original (14.571, 8.599). Um laço de interação percorrendo toda máscara de saída foi utilizado para classificação de cada pixel da Mosaico. Para cada posição (x,y) da matriz classificada foi realizada a alteração da cor do pixel da imagem do mosaico de imagens, com sua respectiva classe de cobertura vegetal, uma vez que ambas possuíam as exatas dimensões. Ao final, foi obtido mosaicos classificados com as 5 classes utilizadas nos modelos

3.4.4 Obtenção das áreas de solo exposto

Para identificação das áreas de solo exposto ocorreu a binarização da imagem classificada, em que os apenas os pixels de cor vermelha passaram a ter valores referente à cor branca (255, 255, 255) e os demais na cor preta (0,0,0) e depois foi feito a conversão desta imagem binarizada para a escala de cinza e deixá-la na estrutura matricial aceita pelo método de encontrar contornos da *opencv*. Em seguida, com o método *cv2.findContours* houve a criação de contornos passando o *array* da imagem binarizada e os parâmetros *cv2.RETR_EXTERNAL*, *cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE*, e obteve-se uma lista com todos os contornos obtidos. Por fim, com um laço de interação foi selecionado de forma arbitrária apenas os contornos com área maior que 0,5 m² e destacando-os na cor vermelha sobre a imagem original para visualização. A imagem processada foi então georreferenciada utilizando uma biblioteca *rasterio*. Os passos resumidos estão apresentados na Figura 11.

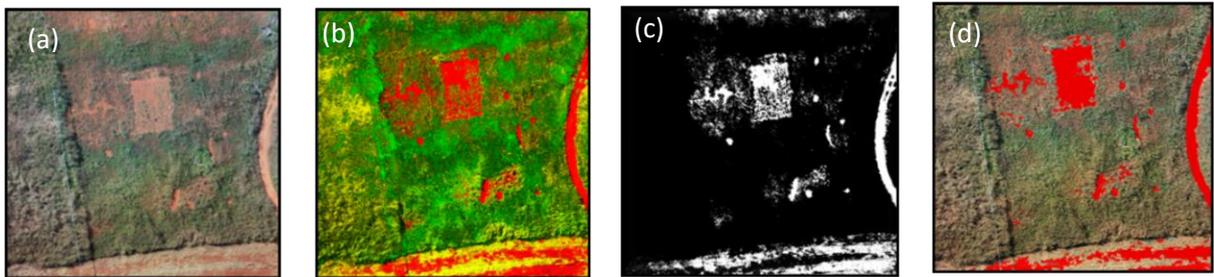


Figura 11 - A imagem apresenta a seqüência do processamento da área e obtenção dos polígonos georreferenciados. (a) imagem original, (b) imagem classificada, (c) imagem binarizada e (d) imagem original com os polígonos georreferenciados. Fonte: autor.

4. RESULTADOS

4.1 TESTES DE BANCADA

Com os dados coletados e tabulados foi realizado o cálculo das vazões instantâneas de cada repetição a partir da variação de massa acumulada na balança a cada leitura. A Figura 12 apresenta o comportamento da vazão do equipamento durante as dez repetições. No eixo y encontra-se as vazões calculadas, em gramas por minuto, e no eixo x o tempo acumulado das leituras.

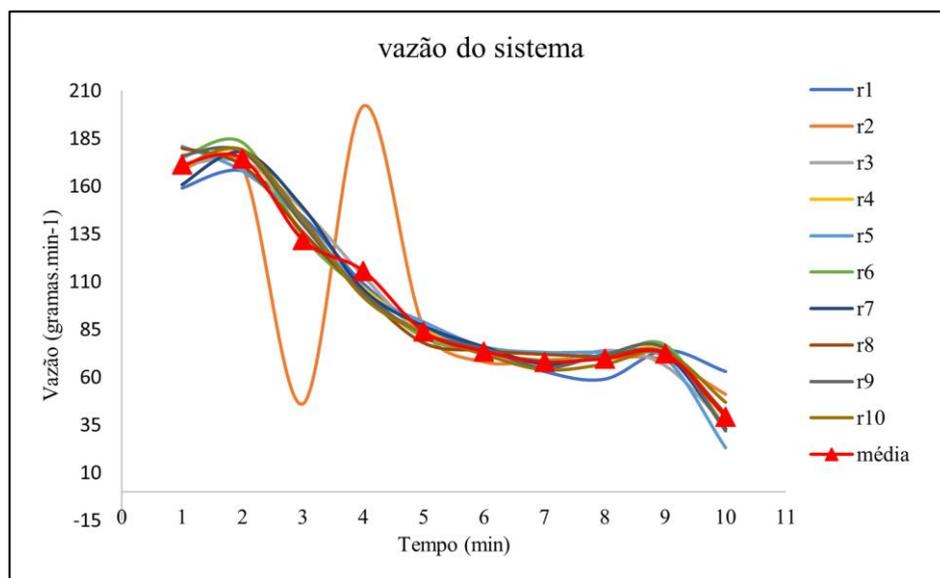


Figura 12 - Curvas de vazões do dispenser com sementes ao longo das 10 repetições. Fonte: autor

O Figura 12 mostra o comportamento do dispenser de sementes em condições controladas de laboratório. Observou-se um padrão característico de vazão em todas repetições. A vazão inicialmente é alta (média de 175 gramas/min) e decresce com o tempo até que o reservatório se esvazie e cesse o fluxo totalmente (a partir do minuto 9).

O tempo médio de esvaziamento total do reservatório em todas as repetições foi de 9 minutos e 36 segundos. Nesse sistema, as sementes são liberadas gradativamente por meio de uma mecânica helicoidal interna, que ao girar empurra as sementes para fora e caem por ação da gravidade. Inicialmente o reservatório está totalmente cheio, e isso pode ocasionar em um escoamento adicional devido a diferença de nível que se formou em uma pequena coluna de massa no interior do reservatório, ou seja, nos instantes iniciais o sistema esteve sob influência

concomitante da mecânica helicoidal, que empurra as sementes para fora, e do escoamento da massa no sentido de menor nível.

Na medida em que o nível interno das sementes diminuiu, houve uma estabilização da vazão do sistema que pode ser observado a partir do minuto 4 em diante. Apenas na repetição 2 houve um comportamento anômalo causado pelo ligeiro entupimento da saída do reservatório (entre os minutos 2 e 3), que refletiu momentaneamente em um menor fluxo mássico, mas que se desobstruiu logo em seguida no minuto 4, que explica o maior valor observado.

Em condições de voo em campo esse tipo de anomalia pode ser mais difícil de ocorrer devido a vibração da aeronave. Adicionar lubrificantes sólidos inertes junto às sementes podem ser uma medida alternativa para diminuir o coeficiente de atrito entre as sementes e com as paredes internas do reservatório e assim melhorar a fluidez do sistema e consequentemente a uniformidade da vazão (FONSECA, A. Z. *et al.*, 2021).

O teste piloto permitiu avaliar o comportamento da vazão do dispenser sob condições de reservatório totalmente cheio até seu total esvaziamento por meio da obtenção de uma curva de decaimento da vazão e dentro dos limites de tempo seguro para missões de voo.

Essa curva é importante para dimensionamento das operações de campo, sobretudo nos casos onde não é possível monitorar em tempo real o nível do reservatório por meio de sensores. Além disso, utilizar reservatório desde dispenser totalmente cheio pode resultar em variações de vazão ao longo do tempo que inicia alta e cai pela metade a partir da segunda metade com o tempo.

Em uma situação real de campo, para que se tenha um padrão uniforme de distribuição, é necessário ajustar a velocidade da aeronave a partir da segunda metade do voo de forma compensar a menor vazão ao longo do percurso ou, se possível, ajustar a vazão do dispensor durante o voo.

Resultados obtidos nesta etapa: (i) parâmetro utilizados na placa controladora (1900 HIGHT e 1500 LOW); (ii) curva de vazão do dispenser utilizando sementes.

4.2 TESTE DE CAMPO

4.2.1 descrição dos dados

A tabela 2 apresenta os dados coletados ao longo do experimento de campo. As linhas contêm a quantidade de sementes que caíram nos raios (2, 3, 4 e 5 metros), seguida do registro

de temperatura máxima e mínima e da somatória das sementes que foram liberadas durante cada repetição. Esses valores totais de sementes equivalem às vazões (gramas/min) já que as sementes liberadas foram em um tempo constante de 1 minuto.

Tabela 2 Tabulação dos dados coletados no experimento.

Altura (m)	Raio (m)				Vento (m.s-1)	Temperatura do ar °C	Quantidade total sementes
	2	3	4	5			
4	170	0	0	0	1-1,2	34-34,5	170
4	137	6	0	0	0-1,1	35,9-36,4	143
4	136	15	0	0	0,7-1,7	35,3-36,1	151
média	147,66	7	0	0			
8	166	3	0	0	0	36,2	169
8	208	0	0	0	0- 2	35	208
8	192	0	0	0	1,5	36	192
média	188,66	1	0	0			
12	146	1	0	0	0	33,4-34,5	147
12	146	5	0	0	0-1,3	35-36	151
12	159	4	1	0	0-1	35,5-36	164
média	150,33	3,33	0,33	0			
16	100	32	6	1	0	32,4-34,1	139
16	123	9	2	0	0-0,9	34,5-35,5	134
16	167	11	4	0	1-1,8	34,2-35,1	182
média	130	17,33333	4	0,33			
20	36	136	28	0	0	32	200
20	178	10	1	0	0	34-35,7	189
20	183	3	0	0	0-1,4	31,7-33	186
média	132,33	49,66	9,66	0			

4.2.2 Vazão do sistema

A Tabela 3 resume os resultados dos diferentes tratamentos, incluindo as médias das vazões em gramas por minuto para cada altura, juntamente com as variâncias calculadas a partir das observações realizadas.

Tabela 3 Resultados descritivos mais detalhados de média e variância dos tratamentos analisados.

Tratamentos	Repetições	Soma	Média	Variância
Alt. 4m	3	464	154,66	192,33
Alt. 8m	3	569	189,66	384,33
Alt. 12m	3	462	154	79
Alt. 16m	3	455	151,66	696,33
Alt. 20m	3	575	191,66	54,33

Observa-se que a maior altura correspondeu a maior média de vazão, seguida da média de vazão na altura 8, e apresentando a menor vazão no tratamento com altura 12 metros. A partir dessa análise exploratória observa-se que as variáveis respostas não seguem um padrão linear com a altura.

Por meio do teste de Shapiro-Wilk verificou-se uma normalidade na distribuição da variável vazão a um nível de confiança de 95%. Isso possibilitou realizar posteriormente a Análise de Variância dos dados. A tabela 4 apresenta o resultado da ANOVA realizada a partir do teste F com 5% de significância. O valor de F calculado maior que F crítico, ou seja, pelo menos uma das médias dos tratamentos apresentaram diferença significativa entre si.

Tabela 4 Análise de variância para as médias dos tratamentos a 5% de significância.

ANOVA

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Tratamentos	5008,66	4	1252,16	4,45	0,025	3,47
Resíduo	2812,66	10	281,26			
Total	7821,33	14				

Após verificar a existência de uma diferença estatística significativa, realizou-se o teste Tukey a 95% de confiança para verificar a existência de diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos. Com base no número de tratamentos (5) e no grau de liberdade do resíduo (10), foi obtido o valor da diferença mínima significativa (DMS), que foi de 26 para diferenciação entre médias. A figura 13 apresenta as médias ordenadas de forma decrescente com suas diferenças estatísticas.

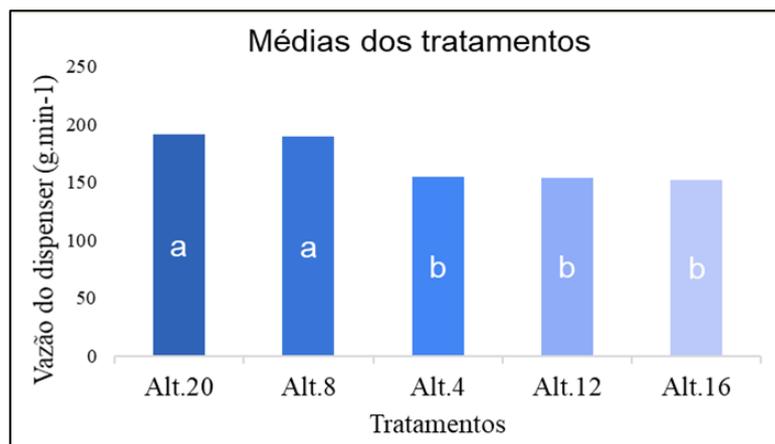


Figura 13 - Gráfico das médias das vazões do equipamento. As letras representam as médias que diferem entre si. Fonte: autor.

Os tratamentos de altura 20 metros e 8 metros apresentaram estatisticamente maior vazão do que os tratamentos de 4, 12 e 16 metros, que não diferem estatisticamente entre si. Como o perfil de velocidade do vento não é linear, são usadas técnicas para descrever seu comportamento com base em modelos matemáticos logarítmicos. Embora esses modelos não sejam precisos, eles são amplamente utilizados para estimar o comportamento ao longo das camadas. (FORTES, B. A. e MAGNAGO, R., 2012).

Nas alturas mais próximas ao solo, as interações do fluxo de ar com a rugosidade da superfície e a topografia do terreno podem causar variações na velocidade do vento que seguem um padrão indefinido e turbulento. Quando uma aeronave não tripulada sobe para camadas superiores, é provável que encontre variações na velocidade e direção do vento. (SILVA, G. R., 2003).

Após analisar a Tabela 1, verificou-se que, embora não tenha ocorrido rajadas de vento significativas a 2 metros do solo durante o tratamento a 20 metros de altura, com exceção de uma variação de 0-1,4 m/s na terceira repetição, foi registrado o menor valor de temperatura durante este tratamento. Isso sugere que houve um deslocamento da massa de ar na região próxima à área do experimento, resultando na queda da temperatura.

A RPA tende a se inclinar na direção oposta ao vetor de força de arrasto do vento ao tentar corrigir seu posicionamento mediante uma rajada de vento. Portanto, em maiores altitudes, a aeronave e todo o sistema embarcado podem ter se inclinado

O fato de a variância ser menor (54,33) corrobora essa hipótese (tabela 2), uma vez que a inclinação constante da RPA possa ter ocasionado em um escoamento adicional das sementes para fora do dispersor, refletindo em uma maior vazão estatisticamente superior, dentre todos os tratamentos. A figura 14 mostra a matriz de correlação obtida por meio do cálculo da correlação de Spearman entre as variáveis de vazão, temperatura e vento. O objetivo da análise foi compreender melhor a relação entre as variáveis e identificar possíveis correlações significativas. A matriz apresenta os valores de correlação entre as variáveis, variando de -1 a 1, onde valores próximos de -1 ou 1 indicam uma forte correlação negativa ou positiva, respectivamente, e valores próximos de 0 indicam ausência de correlação linear entre as variáveis.

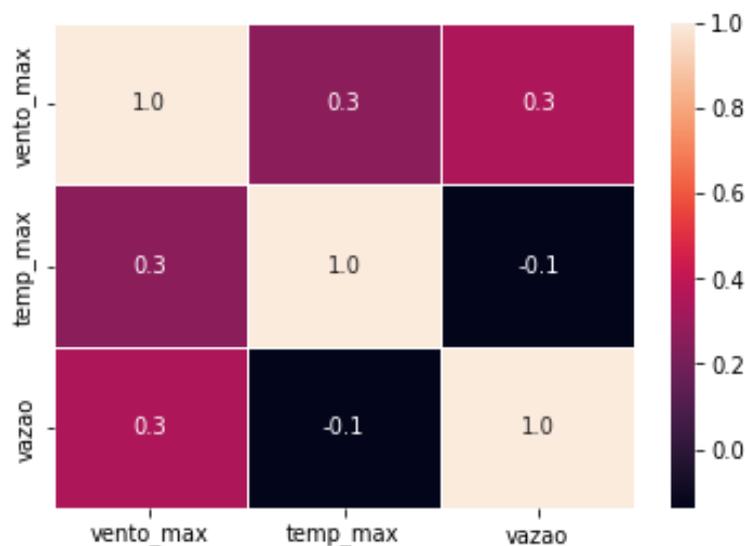


Figura 14 - Matriz de correlação das variáveis temperatura, velocidade do vento e vazão. Fonte: Autor.

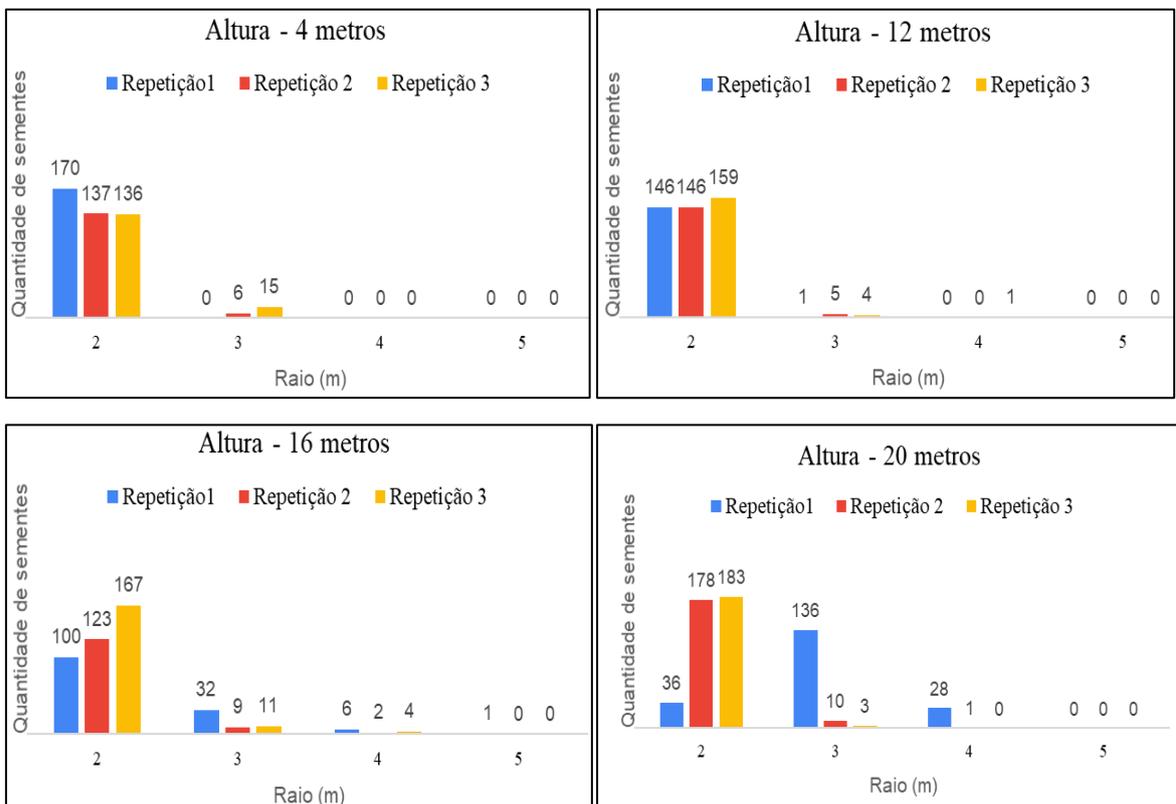
A matriz de correlação apresenta os coeficientes de correlação de Spearman entre as variáveis vazão, temperatura e velocidade máxima do vento observada. A análise da matriz sugere que a vazão tem uma correlação positiva moderada com a velocidade máxima do vento (0,3) e uma correlação negativa fraca com a temperatura, o que indica que quanto maior a velocidade do vento, maior será a vazão do equipamento e menor a temperatura observada. A correlação entre a velocidade do vento e a temperatura é igualmente fraca, sugerindo que essas variáveis não estão fortemente relacionadas. No geral, a análise da matriz de correlação sugere que a velocidade máxima do vento pode ser um fator importante para entender a vazão e da

temperatura, mas não o suficiente para apresentarem uma correlação estatisticamente significativa.

A partir da curva de vazão característica obtida em laboratório (Figura 12) e comparando com as obtidas em campo (tabela 3), nota-se que para uma mesma carga interna de 400 gramas, enquanto no laboratório correspondeu a uma vazão de 100 gramas por minuto, no campo, a vazão mínima observada no campo foi de 154 gramas por minuto. Para fins práticos, a vazão de um equipamento obtida em laboratório será uma referência, mas que tende a ser menor que a obtida em campo devido os fatores do vento e vibração, portanto, implicando em um tempo menor de esvaziamento do reservatório que é importante para o dimensionamento do voo.

4.2.3 Padrão de distribuição espacial

A figura 15 apresenta os gráficos contendo o padrão de distribuição espacial das sementes liberadas em voo em cada tratamento. No eixo x estão os raios de alcance (em metros) onde as sementes foram coletadas nos diferentes raios da pista alvo, e as repetições estão segmentadas por cores. O eixo y apresenta a quantidade de sementes correspondente a cada repetição.



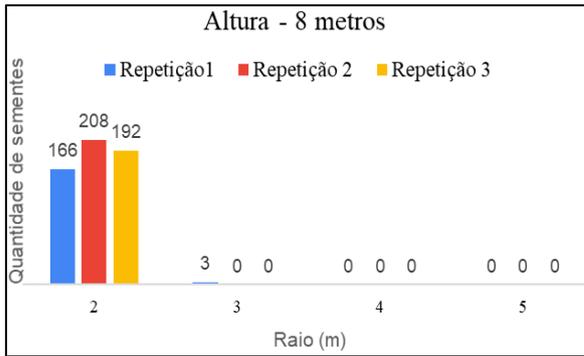


Figura 15 – Distribuição das sementes nos raios de coleta nos raios de coleta para os diferentes tratamentos e repetições. Fonte: autoria própria.

Os gráficos da Figura 12 apresentam um padrão nítido de concentração de distribuição das sementes predominantemente nas faixas centrais da pista coletora alvo, isso também pode ser verificado numericamente por meio das médias aritméticas superiores na região de 2 metros (conforme tabela 1). Nota-se também, que conforme aumentou-se a altura de voo dos tratamentos, houve um maior espalhamento das sementes no solo, o que explica a diminuição das médias de concentração de sementes coletadas num raio de até de 2 metros (Tabela 1).

Em contrapartida, a ocorrência de sementes em um raio de até 3 metros para os tratamentos de maiores altitudes: 12, 16 e 20 metros. Esse fenômeno era esperado, pois conforme aumenta-se a distância entre o a RPA e o solo, há um maior espaço para interações das sementes liberadas em queda livre com os fatores físicos externos, podendo sofrer mudanças em seu curso devido às forças de arrasto ocasionado pelo vento, portanto, implicando em espalhamento em uma área maior.

A velocidade do vento e o erro posicional do GPS da aeronave podem também ter influência nessa distribuição. Observa-se no tratamento de 4 metros que, mesmo que alturas menores, devido às rajadas de vento que ocorreram em todas as repetições (tabela 1), houve uma distribuição espacial das sementes num raio de até 3 metros, que é superior aos tratamentos de maior altitude (8 e 16 metros).

A ausência de sementes em um raio superior a 4 metros em todos os tratamentos, sugere que 4 metros de raio pode ser um parâmetro de base para aplicações deste equipamento em trabalhos posteriores utilizando esse sistema de dispersão. A utilização de mecanismos que ajudem no espalhamento das sementes imediatamente após o bocal do dispenser pode ampliar esse range de espalhamento das sementes, se o objetivo for uma maior dispersão.

Embora a não se tenha a mesma precisão em termos de largura de plantio comparado as semeadoras utilizadas na agricultura, os dados sugerem que faixas de altura de trabalho podem

ser adotadas em função da técnica a ser empregada. Se a finalidade for utilizar a técnica de plantio em faixas bem definidas e homogêneas, importantes para silvicultura, uma faixa de trabalho de 8 a 12 metros obtém uma concentração numa faixa de 4 metros. Por outro lado, quando o delineamento de um PRADA for para realizar plantio em área total com maior espalhamento das sementes, ideal para dispersão de espécies de rápido recobrimento de solo ou para controle de erosões e estabilização de terreno, alturas de trabalho na faixa de 16 a 20 metros garantem uma boa dispersão em uma faixa de até 8 metros. Para utilização em técnicas de nucleação com raios em torno de 4 metros, assim como o realizado por Pietro-souza (2015), pode-se utilizar a aeronave pairando em uma posição fixa para acionamento do dispenser sobre o local fazendo a liberação das sementes por um tempo determinado (assim como no experimento) até atingir a quantidade alvo de interesse. Caso os núcleos forem mais extensos em área, pode-se criar planos de voos circulares com raios parametrizados com o Mission Planner. Esses parâmetros de altura podem ser extrapolados para outras sementes seguindo essa mesma metodologia. Vale ressaltar que é apenas uma faixa estimada, e fatores como o vento, erro posicional podem eventualmente alterar esses valores.

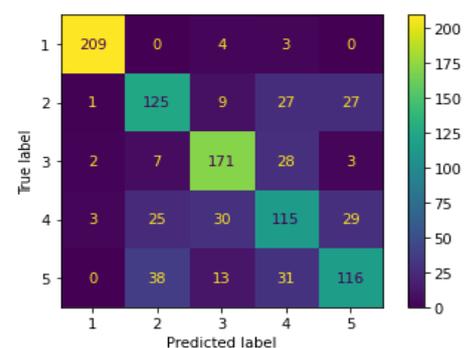
Resultados obtidos nesta etapa: faixa de dispersão de sementes em função da altura;

4.3 MÉTRICAS DOS MODELOS TREINADOS

A seguir, serão apresentadas as métricas obtidas nos treinamentos juntamente com as matrizes de confusão de cada modelo treinado. A matriz de confusão contém os valores verdadeiros das classes no eixo y e os previstos no eixo x. O total de acertos do modelo pode ser obtido pelo somatória diagonal principal.

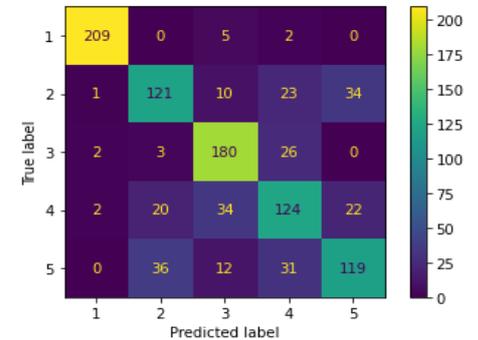
4.3.1 Randon Forest – RF

	precision	recall	f1-score	support
1	0.97	0.97	0.97	216
2	0.63	0.66	0.65	189
3	0.75	0.81	0.81	211
4	0.56	0.57	0.57	202
5	0.66	0.59	0.62	198
accuracy			0.72	1016
macro avg	0.72	0.72	0.72	1016
weighted avg	0.72	0.72	0.72	1016



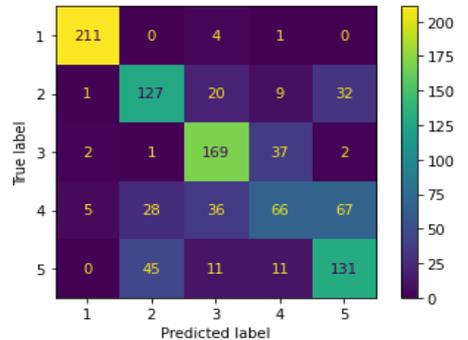
4.3.2 K Nearest Neighbor - KNN

	precision	recall	f1-score	support
1	0.98	0.97	0.97	216
2	0.67	0.64	0.66	189
3	0.75	0.85	0.80	211
4	0.60	0.61	0.61	202
5	0.68	0.60	0.64	198
accuracy			0.74	1016
macro avg	0.74	0.74	0.73	1016
weighted avg	0.74	0.74	0.74	1016



4.3.3 Logistic Regression – RL

	precision	recall	f1-score	support
1	0.96	0.98	0.97	216
2	0.63	0.67	0.65	189
3	0.70	0.80	0.75	211
4	0.53	0.33	0.40	202
5	0.56	0.66	0.61	198
accuracy			0.69	1016
macro avg	0.68	0.69	0.68	1016
weighted avg	0.68	0.69	0.68	1016



As métricas obtidas apresentam o desempenho dos modelos de classificação de cobertura de solo. A acurácia, descrita por *accuracy*, correspondente à taxa geral de acerto dos classificadores. A *macro avg* e *weighted avg*, apresentam a média das métricas, geral e ponderada, para todas as classes preditas, respectivamente. *Precision* é a precisão, que mede a proporção de classificações corretas de cada classe sobre o total de classificações realizadas, enquanto o *recall* mede a proporção de classificações corretas da classe em relação ao total de itens da classe. O *f1-score* é a métrica que combina a *precision* e o *recall* por meio de uma média harmônica, obtendo uma avaliação geral do modelo.

De acordo com os resultados, em todos os modelos treinados, a classe 1 (solo exposto) teve *precision* e *recall* elevados, acima de 96%, o que indica um bom desempenho para essa classe, de forma similar a classe 3 (palhada) que teve *recall* acima de 75%. Tanto a cor do solo mais avermelhada, quanto da palhada mais clara, possuía cores bem distintas e homogêneas, e isso pode ter ajudado aos modelos a classificarem melhor estas classes.

As matrizes de confusão do Modelo RF, e KNN, mostram que, para classe 2 (vegetação rasteira) os classificadores tiveram erros na classe 4 e 5 (vegetação alta e sombra), mostrando

que os modelos não distinguiram bem as diferentes tonalidades de verde que, por vez, podem se confundir com a sombra. E isso refletiu na classificação final mostrado na Figura 16.

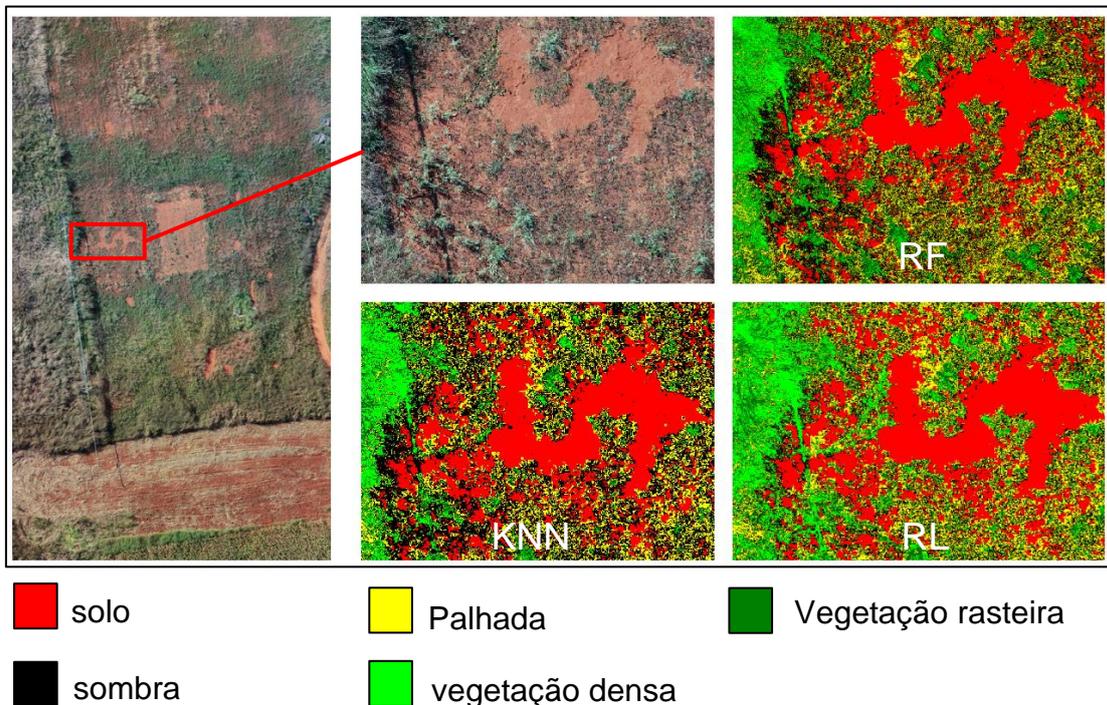


Figura 16 – Mosaico classificado com os modelos treinados. Fonte: autor.

Por meio de uma avaliação visual, nota-se que a classe de solo exposto foi bem classificada nos três modelos. Os modelos RF e KNN apresentaram um nível maior de detalhamento, uma vez que apesar dos erros de classificação apresentados na matriz de confusão conseguiram diferenciar os detalhes das sombras, vegetação rasteira e a vegetação densa.

A classificação com modelo RL apresentou menos detalhamento e diferenciação entre as classes de vegetação com uma predominância de pixel classificados como “vegetação densa”. Isso refletiu em uma baixa precisão e *recall* para esta classe em relação as outras.

Vale ressaltar que embora os três modelos treinados apresentarem resultados satisfatórios em termos de classificação, porém, do ponto de vista prático, apresentaram dificuldades de implementação dos parâmetros ótimos para classificação devido a limitação da memória disponível RAM disponível que elevou consideravelmente o tempo de processamento, sobretudo nos algoritmos RF e KNN (chegou a quase 3 horas de processamento).

Por outro lado, o algoritmo RL, apesar de ser menos preciso, apresentou um rápido processamento (menos de 1 hora) e menos estouro de memória do ambiente de processamento.

Esta área classificada por si só já pode ser utilizada para estabelecer zonas de manejo, uma vez as classes já serão os indicadores que podem ser mensurados de tempos em tempos para avaliação da evolução da recuperação de uma determinada área. Vale ressaltar, que embora estes modelos tenham sido treinados para classificar nesta área, estes podem ser adaptados para outras regiões com características similares em termos de tonalidades (RGB) de cobertura vegetal e tipo de solo.

A seguir, a Figura 17 apresenta a imagem com as áreas de solo exposto classificadas e georreferenciadas de forma automática. Cada polígono na cor vermelha são as áreas de solo exposto acima de $0,5\text{m}^2$ e seu centroide contendo a referência da coordenada geográfica em formato decimal.

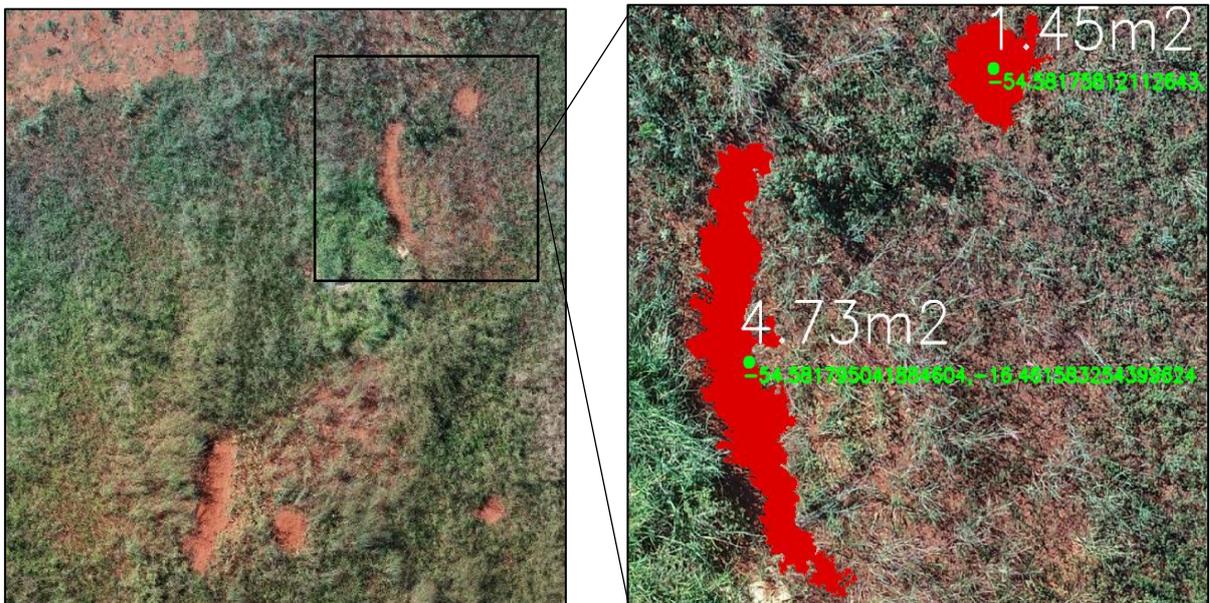


Figura 17 – Recorte da imagem classificada com os polígonos georreferenciados que gerados automaticamente pelo script em Python. Fonte: autor.

Nesta etapa do trabalho foram obtidos três modelos de aprendizado supervisionado, capazes de classificar a cobertura do solo em classes de interesse que serão base para obter indicadores de recuperação ambiental de uma determinada área. Os resultados das classificações foram satisfatórios. Os modelos RF e KNN apresentaram maior precisão e por isso um maior detalhamento das imagens classificadas, que pode ser uma alternativa em casos que demandarem um grande detalhamento das áreas, por exemplo, quando for preciso de maior acurácia no depósito de sementes, identificação de sementes germinadas ou contagem de mudas. Por outro lado, quando não há necessidade de alta acurácia e não tiver recursos computacionais para extensos processamentos, o modelo RL oferece bons resultados para

classificação de solo exposto com um custo computacional relativamente baixo, e tempo total de processamento menor.

As imagens com os polígonos de solo exposto servirão de base para o dimensionamento operacional da dispersão de sementes utilizando drones, onde, as coordenadas geográficas poderão utilizadas para criação de planos de voos automatizados. Vale ressaltar que as ferramentas desenvolvidas nesta pesquisa, tem um carácter metodológico, ou seja, os modelos classificadores podem ser ajustados para outras áreas mediante novos treinamentos, assim como podem ser obtidos outros padrões de dispersão utilizando sementes com outras características físicas ou com outros modelos de dispersores.

Resultados obtidos nesta etapa: modelos de inteligência artificial treinados para classificar imagens aéreas e obtenção de suas coordenadas de forma automatizada .

4.4 DIMENSIONAMENTO OPERACIONAL DE RPAS PARA DISPERSÃO AÉREA DE SEMENTES

Em qualquer operação de campo é importante um bom planejamento visando economia de recursos e eficiência operacional. Nos experimentos anteriores foram obtidos parâmetros da aeronave e da faixa de trabalho em função da altura, dado pelo raio de dispersão médio das sementes no solo. Em seguida, foi desenvolvido modelos de *Machine Learning* capazes de identificar e quantificar locais de solo exposto que deverão ser recuperadas.

Nessa etapa, será proposta uma construção lógica capaz de dimensionar parâmetros operacionais da dispersão aérea com drones e que possa ser generalizado para outros modelos de drones dispersores que utilize dispersão de sementes com vazão contínua (assim como utilizado neste trabalho). Ao final, pretende-se obter modelos matemáticos que apoiem os profissionais de campo na configuração a altura e velocidade do equipamento bem como estimar a quantidade de voos demandada e medir a eficiência operacional da sementeira aérea.

4.4.1 Parâmetros da RPA e dispersor de sementes

Vazão média do equipamento (Q_m) – é a vazão mássica média de sementes em gramas por minuto que é liberada pelo equipamento, que varia de acordo com o tipo de semente. É dada pela razão entre quantidade máxima que o reservatório suporta, pelo tempo total de

esvaziamento, conforme a equação (1). Este procedimento pode ser obtido em bancada assim como o experimento anterior realizado neste trabalho.

$$Qm = \frac{C}{Te} \quad (1)$$

C – capacidade máxima do reservatório (grama)

Te – tempo total de esvaziamento (minuto)

Qm – vazão mássica do dispersor (gramas/minuto)

Tempo de voo com carga máxima (*Tv*) – é o tempo real de voo (min) da aeronave com uma carga constante menor o igual ao limite operacional do equipamento (*payload*). Esse parâmetro deve ser obtido em campo por meio de um teste piloto, pois nem sempre essa informação é disponibilizada e vai depender das condições atuais do equipamento.

Para obter este parâmetro basta preencher o reservatório do dispersor com carga máxima permitida, levantar voo e aguardar até o próprio equipamento acione o modo de voo “*Go home*” que é de retorno automático do equipamento (assumindo que aeronave possua todos modos de voos pré-configurados).

O tempo total entre a decolagem e aterrissagem será o tempo de voo (*Tv*). É importante ressaltar que neste procedimento não será feita a dispersão das sementes, e sim obter uma referência de limite operacional do equipamento sob condições máximas. Ou seja, um parâmetro de tempo máximo que sua RPA poderá voar independente da vazão adotada.

Capacidade de carga real (*Cr*) – é a capacidade de carga útil real (g) que uma RPA consegue transportar e liberar totalmente em um voo a uma dada vazão (*Qm*) durante um tempo de voo *Tv* (min). Esse parâmetro pode ser obtido a partir da equação (2):

$$Cr = Qm * Tv \quad (2)$$

Qm – é a vazão mássica do dispersor (g/min)

Tv – é o tempo de voo com carga máxima (min)

Obs.: O valor de *Cr* deve ser menor ou igual o *payload*.

Veja que o valor de *Cr* pode ser ajustado de acordo com a vazão do dispersor, desde que seu valor final não ultrapasse o *payload* do equipamento. Em casos onde o tempo de descarga

total do reservatório for superior ao tempo de voo, a vazão média será baixa e conseqüentemente a capacidade de carga real será reduzida, nesse caso, uma alternativa é ajustar o valor da vazão do dispersor se for possível.

Uma forma de avaliar a eficiência (e) do sistema de dispersão é calcular a razão entre a quantidade total que o equipamento consegue carregar pela quantidade real que o equipamento consegue liberar em voo e partir da equação (3):

$$e = \frac{Cr}{payload} \quad (3)$$

e – eficiência de carga do sistema

Como Cr sempre será menor que $payload$, essa razão pode assumir um valor máximo igual a 1. A eficiência será maior quanto mais próximo essa relação tende a valor 1, ou seja, nos casos onde a capacidade real do equipamento for bastante próxima ao seu $payload$. Por outro lado, se e é baixo, significa que a capacidade real de carga do equipamento é inferior ao seu $payload$, ou seja, há uma “sobra” de carga que poderia ser melhor aproveitada. Nesse caso, pode-se ajustar a vazão do equipamento e se for o caso trocar o dispersor de sementes por um outro que tenha um reservatório de maior capacidade de armazenamento. A Figura 18 apresenta um resumo ilustrativo da eficiência sistema em função relacionada à capacidade de carga.

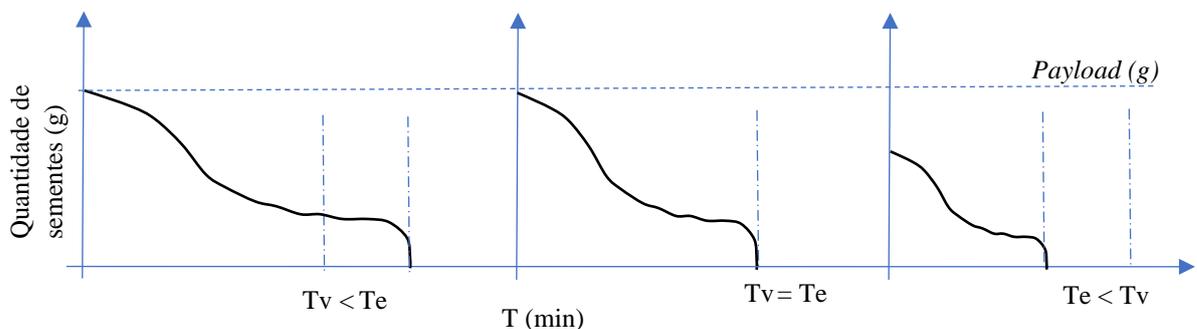


Figura 18 A figura ilustra três exemplos de curvas de vazão do sistema de dispersão ao longo do tempo. (a) representa um sistema de baixa eficiência que devido à baixa vazão do sistema, o tempo de esvaziamento (T_e) é superior ao Tempo de voo (T_v), logo deverá retirar carga do sistema para não retornar o voo com sementes no reservatório. (b) representa um sistema com a vazão ideal suficiente para obter um tempo de esvaziamento é igual ao tempo de voo. (c) representa um sistema de baixa eficiência onde a vazão é suficiente para esvaziar o reservatório, porém capacidade de carga (Cr) é inferior ao $payload$ por limitação do reservatório. Fonte: autor.

As características das sementes, tais como peso, volume e forma devem ser observados para que sejam compatíveis com o sistema de dispersão adotado. Portanto, para executar uma dispersão de sementes, é necessário que o a RPA consiga transportar e dispersar toda sua capacidade de carga em um único voo sem ultrapassar os limites de tempo de voo e de $payload$.

4.4.2 Parâmetros relacionados à semente

Ao utilizar a semeadura como técnica para recuperar uma determinada área, é necessário saber os parâmetros básicos da semente. A normativa nº 30 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), estabelece padrões mínimos que são disponibilizados para comercialização (BRASIL, 2008). O dimensionamento da quantidade de sementes parte, inicialmente, do seu valor cultura (%VC), que é um índice que mede o percentual das sementes puras de um lote capazes de germinar. De acordo com Dias Filho (2012) esse índice pode ser calculado segundo a equação (4):

$$\%VC = \frac{\%Pureza * \%Germinação}{100} \quad (4)$$

No entanto, devido as adversidades do meio, das sementes que germinarem apenas uma parte irá conseguir se estabelecer e dar origem a uma planta. Por isso, a equação (4) pode ser incrementada com um termo adicional que leva em consideração o percentual referente à expectativa de sobrevivência

$$\%VC = \frac{\%Pureza * \%Germinação * \%Expectativa\ de\ sobrevivência}{100} \quad (5)$$

Para calcular a demanda requerida de sementes total (D) para uma é preciso primeiramente saber o tamanho da área (A) em hectares e a população-alvo (P) de indivíduos por metro quadrado e dividir pelo valor cultural. A equação (6) expressa a relação entre estas variáveis:

$$D = \frac{10.000 * A * P}{VC} \quad (6)$$

D – demanda total de sementes (quantidade)

A – área total (ha)

P – população-alvo (indivíduo/m²)

A partir do Peso de Mil Sementes (PMS) é possível converter essa quantidade em massa (kg):

$$Dt = \frac{D * PMS}{1000} \quad (7)$$

Dt – demanda total de sementes (kg)

PMS – peso de mil sementes (g)

4.4.3 Calculando o número de voos

A partir da demanda total de sementes requerida (Dt) para uma área e sabendo a capacidade real carregamento de sementes por voo, conforme a obtida na equação (2), basta calcular a quantidade de voos total necessária para dispersar essa semente:

$$Nt = \frac{Dt * 1000}{Cr} \quad (8)$$

Nt – número total de voos requerido

Dt – Demanda total de sementes (kg)

Cr – capacidade de carga real (g)

4.4.4 Distância linear total de Voo - DLT

Uma vez calculado a quantidade de voos, o próximo passo será determinar como serão feitos os voos. A distância linear total (DLT) que a RPA irá percorrer na área demandada pode ser obtida pela razão entre a área total demandada (A) e a distância entre linhas de plantio (E) conforme a equação (9):

$$DLT(m) = \frac{\text{Área (ha)}}{E (m)} * 10.000 (m) \quad (9)$$

O espaçamento E é definido de acordo com os objetivos do projeto, ou seja, se a finalidade for uma dispersão mais homogênea utiliza-se linhas mais próximas com uma maior sobreposição entre as faixas de dispersão de sementes, ao passo que linhas mais distantes resultará em uma menor sobreposição e conseqüentemente uma dispersão menos homogênea. Como já foi mostrado no experimento de campo, a altura de voo influencia no perfil de distribuição das sementes no solo (Figura 19), bem como sua faixa de dispersão (F), por isso o ajuste deste parâmetro é importante ajudar na homogeneidade da dispersão.

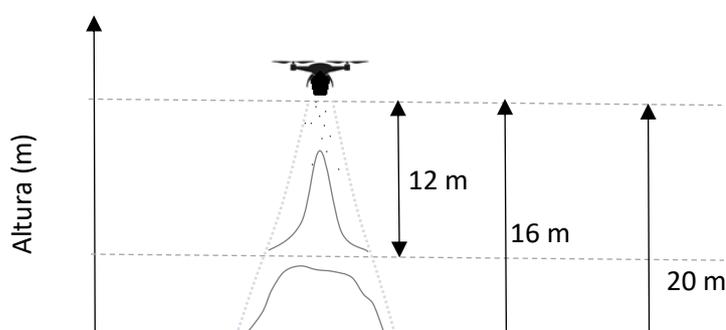


Figura 19 A figura ilustra o perfil de distribuição de sementes liberadas em diferentes alturas. Em menores altitudes as sementes tendem a se concentrar na linha de voo com uma faixa útil de dispersão menor, e em maiores altitudes há uma maior dispersão das sementes com uma faixa útil de dispersão mais larga.

Por exemplo, se em uma área de 1ha com espaçamento de 2 metros:

$$DLT(m) = \frac{1}{2} * 10.000 (m)$$

$$DLT = 5.000 m = 5 km.$$

4.4.5 Quantidade de sementes por metro linear

Uma vez definida a distância total que o drone irá percorrer linearmente e sabendo a demanda total de sementes a serem liberadas, basta calcular a quantidade de sementes por metro linear, e este será o parâmetro alvo a ser atingido. Esta medida será referência para ajustar a velocidade do equipamento.

$$Q_s = \frac{n^\circ \text{ total sementes} * PMS}{DLT} \frac{1}{1000} \quad (10)$$

Q_s – peso de sementes por metro linear (g/m)

DLT – distância linear total (m)

PMS – peso de mil sementes (g)

4.4.6 Velocidade e Vazão da RPA

Para atingir a quantidade de sementes por metro linear alvo (Q_s) deve-se combinar a vazão do sistema de dispersão com velocidade da aeronave. Lembrando que a velocidade máxima permitida é geralmente especificada pelo fabricante e a vazão (Q_m) é determinada previamente em bancada. Logo, a velocidade pode ser definida pela equação (11):

$$V = \frac{Q_m/60}{Q_s} \quad (11)$$

V – velocidade do drone (m/s)

Q_m – vazão mássica do dispersor (g/min)

Q_s - gramas de sementes por metro linear (g/m)

4.4.7 Área de dispersão por voo

Uma vez definida a velocidade (V) da RPA, e utilizando a equação da velocidade média, calcula-se percorrida pela aeronave em cada voo:

$$Vm = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (12)$$

$$\Delta d = Vm * \Delta t$$

$$\Delta d = 60(V * Tv) \quad (13)$$

Tv – tempo de voo (min)

V – velocidade da RPA (m/s)

Δd – distância dv linear percorrida por voo (m)

Multiplicando distância percorrida pelo espaçamento (E) obtém-se a área realizada em cada voo.

$$Av = dv * E = 60(V * Tv) * E \quad (13)$$

Av – área realizada em cada voo (m²)

dv – distância linear percorrida por voo (m)

E – espaçamento entre linhas de voo (m)

4.4.8 Área útil de dispersão por voo

Vale ressaltar que este parâmetro não diz respeito à área de cobrimento real das sementes no solo e sim da área que será sobrevoada em cada voo. Logo, a área real de dispersão por voo é obtida pela mesma equação, mas utilizando a faixa de dispersão útil (F) (ver figura 20) ao invés do espaçamento (E):

$$Au = dv * F \quad (14)$$

Au - área de dispersão útil realizada em cada voo (m^2)

F - faixa de dispersão (m)

Fazendo a razão entre Av e Au obtém-se um coeficiente que mensura o percentual de cobertura do solo, ou seja, a homogeneidade (h) da dispersão (Equação 15):

$$\% h = 100 * \frac{Au}{Av} \quad (15)$$

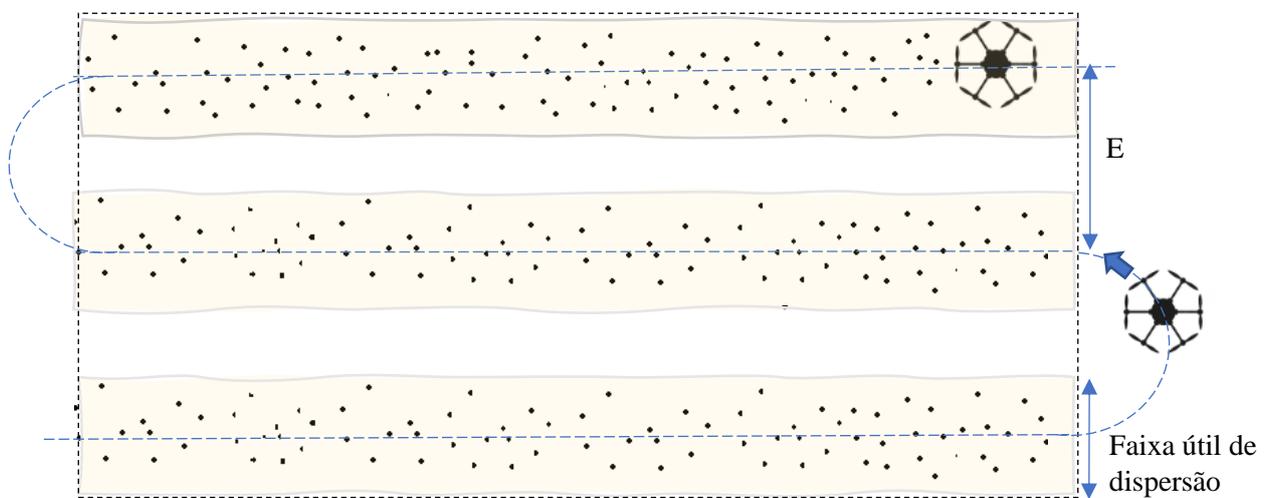


Figura 20 A figura ilustra as linhas de voo de uma RPA. A área tracejada representa a área total realizada por voo, e as destacadas representam a área útil de dispersão, que está ligada à altura do drone e ao padrão de espalhamento das sementes no solo.

4.4.9 Cálculo da produtividade diária

A quantidade de voos por dia está relacionada com o número de baterias disponíveis para trabalho e com a quantidade de voos realizados por bateria. Por exemplo, se uma pessoa possui 3 pares de baterias, mas com condições de recarregar 2 pares ao longo do dia, logo o total disponível serão 5 pares. Dependendo do modelo da aeronave, é possível realizar mais de um voo por carga de bateria. Desse modo, quantidade total de voos pode ser calculada da seguinte forma:

$$Nv = n^{\circ} \text{ voo por bateria} * \text{quantidade de par de bateria disponível} \quad (16)$$

Nv - número de voos por par bateria

Para as RPAs que possui a configuração de apenas uma bateria para alimentação do sistema, o raciocínio é igualmente válido, bastando utilizar na equação (16), o número de unitário de baterias disponíveis ao invés do número de pares de baterias. A produtividade diária pode ser obtida:

$$\text{Área por dia} = Nv * Av \quad (17)$$

Av – área realizada em cada voo (m^2)

Finalmente, dividindo a quantidade total de voos requeridos pelo número de voos diário obtém-se uma estimativa de dias de trabalho:

$$n^\circ \text{ dias de trabalho} = \frac{Nt}{Nv} \quad (18)$$

Nt – número total de voos requerido

Nv – número total de voos por dia

Assim, a partir destas equações, é possível modelar o processo de dispersão aérea de sementes com drones, servindo como ferramenta de apoio para o dimensionamento de projetos. Baseados nessas equações, foi elaborado uma planilha automatizada (Figura 21) para facilitar esses cálculos e que pode ser utilizada de forma fácil por técnicos ambientais ou qualquer profissional que queira realizar semeadura aérea com RPA.

Campos de entrada de parâmetros	PARÂMETROS DE ENTRADA DA SEMENTE	PARÂMETROS DE ENTRADA DA RAPA/DISPENSER																																				
Campos de parâmetros calculados																																						
Legenda:																																						
PMS - Peso de Mil sementes (g)																																						
Payload - Carga máxima permitida pelo RPA																																						
C - Capacidade do dispenser (g)																																						
Tv - Tempo de voo (min)																																						
Te - Tempo de esvaziamento do dispenser																																						
Cr - Capacidade de carga real do dispenser (g)																																						
e - Eficiência do sistema de dispersão																																						
DLT - distância linear total (m)																																						
	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Informações da semente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>PMS (g)</td><td>20</td></tr> <tr><td>População alvo (plantas/m²)</td><td>5</td></tr> <tr><td>Germinação (%)</td><td>80%</td></tr> <tr><td>Expectativa de sobrevivência (%)</td><td>7%</td></tr> <tr><td>Pureza (%)</td><td>96%</td></tr> <tr><td>Área (ha)</td><td>4</td></tr> <tr><td>E (m)</td><td>5</td></tr> <tr><td>F (m)</td><td>4</td></tr> </tbody> </table>	Informações da semente		PMS (g)	20	População alvo (plantas/m ²)	5	Germinação (%)	80%	Expectativa de sobrevivência (%)	7%	Pureza (%)	96%	Área (ha)	4	E (m)	5	F (m)	4	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Parâmetros do drone e dispenser</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Payload (g)</td><td>3.000</td></tr> <tr><td>C (g)</td><td>1.500</td></tr> <tr><td>Te (min)</td><td>5</td></tr> <tr><td>Tv (min)</td><td>5</td></tr> <tr><td>Qm (g/min)</td><td>300</td></tr> <tr><td>Cr (g)</td><td>1.500</td></tr> <tr><td>N°voo por Bateria (par)</td><td>2</td></tr> <tr><td>N° Bateria disponível (par)</td><td>3</td></tr> </tbody> </table>	Parâmetros do drone e dispenser		Payload (g)	3.000	C (g)	1.500	Te (min)	5	Tv (min)	5	Qm (g/min)	300	Cr (g)	1.500	N°voo por Bateria (par)	2	N° Bateria disponível (par)	3
Informações da semente																																						
PMS (g)	20																																					
População alvo (plantas/m ²)	5																																					
Germinação (%)	80%																																					
Expectativa de sobrevivência (%)	7%																																					
Pureza (%)	96%																																					
Área (ha)	4																																					
E (m)	5																																					
F (m)	4																																					
Parâmetros do drone e dispenser																																						
Payload (g)	3.000																																					
C (g)	1.500																																					
Te (min)	5																																					
Tv (min)	5																																					
Qm (g/min)	300																																					
Cr (g)	1.500																																					
N°voo por Bateria (par)	2																																					
N° Bateria disponível (par)	3																																					
	<table border="1"> <tbody> <tr><td>Vc (%)</td><td>5,4%</td></tr> <tr><td>Plantas/ha</td><td>50.000</td></tr> <tr><td>n° semente total</td><td>930.060</td></tr> <tr><td>Demanda total de sem. - Dt (kg)</td><td>18,60</td></tr> </tbody> </table>	Vc (%)	5,4%	Plantas/ha	50.000	n° semente total	930.060	Demanda total de sem. - Dt (kg)	18,60	<table border="1"> <tbody> <tr><td>e (%)</td><td>50%</td></tr> <tr><td>DLT (m)</td><td>8.000</td></tr> <tr><td>Qs (g/m)</td><td>2,33</td></tr> <tr><td>V (m/s)</td><td>2,15</td></tr> <tr><td>h (%)</td><td>80%</td></tr> </tbody> </table>	e (%)	50%	DLT (m)	8.000	Qs (g/m)	2,33	V (m/s)	2,15	h (%)	80%																		
Vc (%)	5,4%																																					
Plantas/ha	50.000																																					
n° semente total	930.060																																					
Demanda total de sem. - Dt (kg)	18,60																																					
e (%)	50%																																					
DLT (m)	8.000																																					
Qs (g/m)	2,33																																					
V (m/s)	2,15																																					
h (%)	80%																																					
	<table border="1"> <tbody> <tr><td>n° total voo requerido - Nt</td><td>12</td></tr> <tr><td>Área feita por voo - Av (m²)</td><td>3.226</td></tr> <tr><td>Área útil feita por voo - Au (m²)</td><td>2.580</td></tr> <tr><td>Área por dia (m²)</td><td>19.354</td></tr> <tr><td>N° voo por dia</td><td>6</td></tr> </tbody> </table>	n° total voo requerido - Nt	12	Área feita por voo - Av (m ²)	3.226	Área útil feita por voo - Au (m ²)	2.580	Área por dia (m ²)	19.354	N° voo por dia	6																											
n° total voo requerido - Nt	12																																					
Área feita por voo - Av (m ²)	3.226																																					
Área útil feita por voo - Au (m ²)	2.580																																					
Área por dia (m ²)	19.354																																					
N° voo por dia	6																																					

Figura 21 - Planilha automatizada para dimensionamento operacional da semeadura aérea com RPA e preenchida previamente com valores fictícios para exemplificação de uso. Fonte: Autor.

Resultados obtidos nesta etapa: equações para dimensionamento das operações de semeadura aérea com drones; planilha para de apoio para dimensionamento operacional;

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos as aeronaves remotamente pilotadas ganharam espaço em diversos segmentos, e atualmente vêm sendo empregadas também como ferramenta complementar e projetos de recuperação de áreas degradadas, em particular, nas aplicações de semeadura aérea.

O estudo objetivou a obtenção de parâmetros de voo básicos que pudessem apoiar no planejamento operacional de ações de campo:

(1) Foi desenvolvida uma metodologia simplificada e de fácil reprodução, que pudesse auxiliar na mensuração do padrão de espalhamento espacial da semeadura aérea com drones;

(2) O experimento demonstrou que, dentro da faixa estudada, maiores alturas em relação ao solo, refletiram em maior espalhamento em solo. Isso pode ser positivo, quando a dispersão estiver associada à semeadura direta em área total a ser recuperada, mas não ser apropriada para semeadura em linhas estreitas com poucos centímetros de largura;

(3) A dispersão de sementes realizada a 20 metros foi a que obteve o maior alcance num raio de 4 metros que é considerado a faixa útil de dispersão, e que as rajadas de vento teve influência na vazão do equipamento e no espalhamento das sementes no solo mesmo em altitudes baixas de 4 metros. Isso pode ser adequado, quando a dispersão estiver associada à semeadura direta em núcleos de diversidade (nucleação), desde que o plano de voo esteja configurado para tal situação, linhas de voo com pontos determinadas em pontos da linha;

(4) Foram testados modelos de inteligência artificial treinados para identificação locais de solo exposto e suas coordenadas geográficas. Isso é importante para a realização de voos diagnósticos na área degradada e a determinação posterior de qual técnica de semeadura aérea será a mais apropriada. Em todos os modelos, as classes de solo foram detectadas com alta precisão e acurácia. Os modelos RF e KNN apresentaram maior precisão geral, com maior detalhamento das imagens aéreas classificadas, sendo uma alternativa em casos que seja necessário a identificação de pequenas clareiras para a dispersão pontual de sementes. O modelo RL, apresentou menor precisão geral em relação aos demais modelos, mas obteve uma adequada

resposta, na detecção de solo exposto, com um baixo custo computacional que refletiu tempo total de processamento;

(5) Os resultados informados em (4) são fundamentais para a determinação das técnicas de semeadura aérea. Por exemplo, na técnica de enriquecimento vegetal, ou seja, quando já houve um plantio anterior de sementes ou mudas, e que em momento posterior ocorrerá um replantio de espécies de sombra (secundárias tardias e climáticas) ou para corrigir falhas no plantio, que resultou na formação de clareiras na área em recuperação; e finalmente

(5) Com essas áreas quantificadas é possível dimensionar as operações de campo a partir das equações desenvolvidas que tornam a aplicação das técnicas de semeadura aérea com um balanço positivo em termos de custo x efetividade, otimizando equipes de trabalho em campo, reduzindo a exposição de pessoas aos riscos operacionais em locais de acesso restrito além de poder promover o reflorestamento em grande escala.

Como sugestão para trabalhos futuros seguem: replicar a metodologia para outros tipos de sementes a fim de obter parâmetros operacionais de outras espécies de interesse aos projetos de recomposição vegetal; aprimorar os cálculos de dimensionamentos e integrar aos modelos de classificação das imagens, e a partir disso desenvolver um solução integrada (software) que classifique e forneça todos os parâmetros de referência operacional de configuração do equipamento.

6. REFERÊNCIAS

AGHAI, M.; MANTEUFFEL-ROSS, T. Enhancing Direct Seeding Efforts With Unmanned Aerial Vehicle (UAV) “Swarms” and Seed Technology. *Revista Tree Planters' Notes*. v. 63, n. 2, 2020. p. 32-48.

ALMEIDA, D. R. A. *et al.* Monitoring the structure of forest restoration plantations with a drone-lidar system. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 79, p. 192-198, 2019.

ALMEIDA, DANILO SETTE. Recuperação ambiental da Mata Atlântica. *Revista e Ampliada*, 3 ed, p. 24-30. ISBN 978-85-7455-440-2. Ilhéus, 2016.

AMADOR-JIMÉNEZ, M., MILLNER, N., PALMER, C. *et al.* The Unintended Impact of Colombia’s Covid-19 Lockdown on Forest Fires. *Environ Resource Econ* 76, 1081–1105 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00501-5>

AMORÓS, L.; L., J. Aerial robotics for forest management and seeding. *Refor. Biodivers. Carbon Capture Livelihoods* 2015, 151, 10–17.

ANDRADE, Raúl Duarte Nóbrega. Criação de uma estação de testes para um micro-helicóptero autónomo. 2012. Tese de Doutoramento. Universidade da Madeira (Portugal).

ARDUPILOT. Loiter Mode. 2022. Disponível em : <<https://ardupilot.org/copter/docs/loiter-mode.html>>Acesso em: junho 2022.

ARDUPILOT. Mission Planner overview. 2022. Disponível em : <<https://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>>Acesso em: julho 2022.

ATTANASIO, C. M. *et al.* Adequação ambiental de propriedades rurais: recuperação de áreas degradadas: restauração de matas ciliares. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2006.

BAENA, S.; BOYD, D. S.; MOAT, J. UAVs in pursuit of plant conservation-Real world experiences. *Ecological informatics*, v. 47, p. 2-9, 2018.

BARNETT J. P, BAKER, J. B. Regeneration methods. In: Duryea, M. L., & Dougherty, P. M. editors. (1991). *Forest regeneration manual*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; p. 35-50.

BARROS, Carvalho; SUASSUNA, Larissa; LEUZINGER, Marcia Dieguez. The Use of Drones as a Tool for Biodiversity Conservation in Brazil. **Braz. J. Int'l L.**, v. 16, p. 141, 2019.

BELMONTE, A. *et al.* UAV-derived estimates of forest structure to inform ponderosa pine forest restoration. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, v. 6, n. 2, p. 181-197, 2020.

BENINI, R. *et al.* Manual de restauração da vegetação nativa, Alto Teles Pires, MT. **Cuiabá: The Nature Conservancy**, 2016. Disponível em: <<https://www.terrabrasil.org.br/ecotecadigital/index.php/estantes/gestao/3576-manual-de-restauracao-da-vegetacao-nativa>> Acesso em: janeiro de 2023.

BORGES, W. L. *et al.* 2018. Cobertura do solo, acúmulo de biomassa e de nutrientes em leguminosas para uso como adubo verde. Macapá: Embrapa Amapá.. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1102721>>. Acesso em: janeiro 2023.

BONN CHALLENGE. Bonn Challenge- Restore our future, 2023. Disponível em: <<https://www.bonnchallenge.org/about>>. Acesso em 27 de junho de 2023.

BONN CHALLENGE. Bonn Challenge- Restore our future, 2023. Disponível em: <<https://www.bonnchallenge.org/about>>. Acesso em 27 de junho de 2023.

BRANCALION, P. H. *et al.* Emerging threats linking tropical deforestation and the COVID-19 pandemic. *Perspectives in ecology and conservation*, v. 18, n. 4, p. 243-246, 2020.

BRASIL. Decreto-Lei 5.452 de 1º de maio de 1943. Consolidação das Leis do trabalho, Brasília,DF, Out. 2017.

BRASIL. Planaveg: Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa. Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Ministério da Educação. Brasília: DF. 2017. p. 13.

CARPANEZZI, A. A. *et al.* Espécies pioneiras para recuperação de áreas degradadas: a observação de laboratórios naturais. Congresso Florestal Brasileiro, v. 6, p. 216-221. Campos do Jordão, 1990.

CASTRO, J. *et al.* Forest restoration is more than firing seeds from a drone. *Restor Ecol* e13736, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/rec.13736>>. acesso em julho de 2022.

CASTRO, J. *et al.* Precision restoration: A necessary approach to foster forest recovery in the 21st century. *Restoration Ecology*, v. 29, n. 7, p. e13421, 2021.

CAVA, M. G. *et al.* Comparação de técnicas para restauração da vegetação lenhosa de Cerrado em pastagens abandonadas. *Hoehnea*, v. 43, p. 301-315, 2016.

CORTINA, Jordi *et al.* Prioridades tecnológicas en países SIACRE. 2017. Disponível em: <<https://cosechador.siu.edu.ar/bdu/Record/I65-R17120.500.12049-4028>>. Acesso em janeiro de 2023.

DERSCH, Sebastian *et al.* Combining graph-cut clustering with object-based stem detection for tree segmentation in highly dense airborne lidar point clouds. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 172, p. 207-222, 2021.

DIAS-FILHO, M. B. Formação e manejo de pastagens. 2012. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/937485/1/OrientalComTec235.pdf>> Acesso em janeiro 2023.

ELLIOTT, S. The potential for automating assisted natural regeneration of tropical forest ecosystems. *Biotropica*, v. 48, n. 6, p. 825-833, 2016.

EMBRAPA. Estratégia de recuperação |Regeneração Natural com Manejo| Enriquecimento. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/codigo-florestal/enriquecimento>>. Acesso em janeiro 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, p.353, 2013.

AGHAI M, MANTEUFFEL-ROSS T. Enhancing direct seeding efforts with unmanned aerial vehicle (UAV) “swarms” and seed technology. *Tree Planters' Notes* 63: 32– 48, 2020.

FERREIRA, R. A. *et al.* Semeadura direta com espécies florestais na implantação de mata ciliar no Baixo São Francisco em Sergipe. *Scientia Forestalis*, v.37, n.81, p.37-46, 2009.

FONSECA, A. Z. *et al.* Efeito da velocidade de semeadura e dose de lubrificante sólido no estabelecimento da cultura do milho. 2021. Dissertação de mestrado. disponível em <<https://repositorio.ufsm.br/handle/1/22147>>. Acesso em julho 2022

FORTES, B. A. *et al.* Estudo do perfil logarítmico da velocidade do vento na região do Pampa gaúcho. *Cadernos UniFOA*, v. 7, n. 1 Esp, p. 323-323, 2012.

FORTES, E. P. Seed Plant Drone for Reforestation. *The Graduate Review*, 2, 13-26, 2017. disponível em: <https://vc.bridgew.edu/grad_rev/vol2/iss1/7>. Acesso em janeiro 2023.

GILLER, K. E. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. Cabi, 2001.

ISERNHAGEN, I. *et al.* Uso de semeadura direta de espécies arbóreas nativas para restauração florestal de áreas agrícolas, Sudeste do Brasil. **Piracicaba, SP**, v. 105, 2010.

- KAGEYAMA, P. Y.; GANDARA, F B. Recuperação de áreas ciliares. Matas ciliares: conservação e recuperação. Tradução . São Paulo: EDUSP/FAPESP, 2000. . . Acesso em: 02 mar. 2023.
- KLIDZIO, A. M.; KAGEYAMA, M. H. A.; OLIVA, S. H. E SILVEIRA, S. O. (2020) Uso de drones em logística. XI FATECLOG: Os desafios da logística real no universo virtual. Bragança Paulista, São Paulo.
- KOMAZAKI, J. M. *et al.* Avaliação da qualidade geométrica de modelos digitais do terreno obtidos a partir de imagens adquiridas com VANT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA. 2017. p. 576-580.
- LENS, E. R.; Monitoramento de Recuperação de Áreas Degradadas. **Jornal Internacional de Ciências** , v. 13, pág. 18-20, 2023.
- LIMA, M. M. et al. Sobrevivência inicial de seis espécies usadas na recuperação de uma área degradada na Caatinga. Revista Ouricuri, v. 5, n. 2, p. 132-137, 2015.
- LIU, Y.; ZHANG, X.; GUAN, X.; DELAHAYE, D. Adaptive sensitivity decision based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization. Aerospace Science and Technology, v. 58, p. 92–102, 2016. Elsevier Masson SAS. DOI: 10.1016/j.ast.2016.08.017.
- MARQUEZAM, G. L. *et al.* Análise de viabilidade drone classe 3 de pulverização voltado para aplicação na agricultura. 2022.
- MARTINS, S.V. Recuperação de áreas degradadas: ações em Áreas de Preservação Permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2009. 270p.
- MATTEI, V. L. Comparação entre semeadura direta e plantio de mudas produzidas em tubetes, na implantação de povoamentos de Pinus taeda L. Curitiba: UFPR, 1993. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, 1993.

MATTEI, V. L. Preparo do solo e uso de protetor físico, na implantação de *Cedrela fissilis* V. e *Pinus taeda* L., por semeadura direta. *Revista Brasileira de Agrociência*, 1 (3), 127-132, 1995.

MELO, R. R. S. Diretrizes para inspeção de segurança em canteiros de obra por meio de imageamento com veículo aéreo não tripulado (VANT). Salvador, 2016. 160p. Dissertação (Mestrado) -Escola Politécnica, Universidade Federal de Bahia.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO - Instrução Normativa nº 30, de 21 de maio de 2008. Disponível em: https://members.wto.org/crnattachments/2008/sps/BRA/08_1679_00_x.pdf. Acesso em: janeiro de 2023.

MOHAN, M. *et al.* UAV-supported forest regeneration: Current trends, challenges and implications. *Remote Sensing*, v. 13, n. 13, p. 2596, 2021.

MOURA JR., J.; LORDSLEEM JR. A. Tecnologias emergentes: Estudo exploratório de inspeção de manifestações patológicas de fachadas utilizando veículo aéreo não tripulado (VANT). Mostra de Extensão, Inovação e Pesquisa da POLI/UPE 2018. Recife. Anais..Recife, 2018.

NAWAZ, H. *et al.* Effect of solvent polarity on extraction yield and antioxidant properties of phytochemicals from bean (*Phaseolus vulgaris*) seeds. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*, v. 56, 2020.

NERIS, L. O. *et al.* Um piloto automático para as aeronaves do projeto ARARA. 2003. dissertação de mestrado.

NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, v. 6, p. 1–15, 2014.

NOVAIS, J. M. P. *et al.* Técnicas de revegetação em uma zona ripária no município de Campo Verde, Mato Grosso. 2018. Dissertação de mestrado. Disponível em < <http://ri.ufmt.br/handle/1/2921> >. Acesso em janeiro de 2023.

PARANHOS FILHO, A. C. *et al.* Dispositivo para Avaliação de Área Degradada. 2017, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020170205045, título: "Dispositivo para avaliação de Área Degradada", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 25/09/2017.

PIETRO-SOUZA, W.; SILVA, N. M. Plantio manual de muvuca de sementes no contexto da restauração ecológica de áreas de preservação permanente degradadas. *Revista Brasileira de Agroecologia*, [S. l.], v. 9, n. 3, 2015. Disponível em: <https://revistas.aba-agroecologia.org.br/rbagroecologia/article/view/15350>. Acesso em: 24 fev. 2023.

RANA, K.; PRAHARAJ, S.; NANDA, T.. Unmanned aerial vehicles (UAVs): An emerging technology for logistics. *International Journal of Business and Management Invention*, v. 5, n. 5, p. 86-92, 2016.

RAUPP, P. P. *et al.* Direct seeding reduces the costs of tree planting for forest and savanna restoration. *Ecological Engineering*, v. 148, p. 105788, 2020.

RESMINI, R. *et al.* Eco Dados. 2018. Patente: Programa de Computador. Número do registro: BR512019000975-4, data de registro: 19/08/2018, título: "Eco Dados", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

RODRIGUES, A. B. M.; GIULIATTI, N. M.; JÚNIOR, A. P.. Aplicação de metodologias de recuperação de áreas degradadas nos biomas brasileiros. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 1, p. 333-369, 2020.

RODRIGUES, D. A.; GALLARDO, ALCF. Vantagens da aerofotogrametria por drone na obtenção de dados topográficos em estudos de lixões e aterros sanitários. VII Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade. Anais. São Paulo, 2018.

RODRIGUES, R. R.; GANDOLFI, S. Restauração de florestas tropicais: subsídios para uma definição metodológica e indicadores de avaliação e monitoramento. *Recuperação de Áreas Degradadas*. Tradução . Viçosa: UFV, Departamento de Solos; Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas, 1998. . Acesso em: 20 fev. 2023.

DIAS, L. E.;MELLO, J. W. V. Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, UFV, sociedade brasileira de recuperação de áreas degradadas. Viçosa: Editora Folha de Viçosa Ltda, 1998. 251p.

SANKEY, T. et al. UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sensing of Environment*, v. 195, p. 30-43, 2017.

SANTOS, *et al.* Características agronômicas e degradação de grãos e da planta de milho em diferentes épocas de semeadura e de maturidade. 2012. 61p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SANTOS, G. G. (2010). Impacto de sistemas de integração lavoura pecuária na qualidade física do solo. Goiânia: UFG. 122p. Tese Doutorado. Disponível em <<https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/461> >. Acesso em janeiro 2023.

SANTOS, N. G. B.. Gestão do projeto de recuperação de áreas degradadas: estratégia para aperfeiçoamento. 2013. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rondonópolis, 2013.

SANTOS, P. L. *et al.* Estabelecimento de espécies florestais nativas por meio de semeadura direta para recuperação de áreas degradadas. *Revista Árvore*, v. 36, p. 237-245, 2012.

SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE DE MATO GROSSO (SEMA). Decreto nº 420, de 05 de fevereiro de 2016. Disponível em: <<https://app1.sefaz.mt.gov.br/0325677500623408/7C7B6A9347C50F55032569140065EBBF/D83C12A7022F659384257F550060503B>>. Acesso em 31 de julho 2022.

SILVA, G. R. Características de Vento da Região Nordeste: análise, modelagem e aplicações para projetos de centrais eólicas. 2003. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

SILVA, N. M; BARBOSA, D. S.; LOPES, K. Processo de recuperação de áreas degradadas por meio de cápsulas biodegradáveis aladas dispersas por aeronave remotamente pilotada. 2020, Brasil. Patente: Privilégio de Inovação. Número do registro: BR1020200251023, título: "Processo de recuperação de áreas degradadas por meio de cápsulas biodegradáveis aladas

dispersas por aeronave remotamente pilotada", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 09/12/20.

SILVA, Rodrigo *et al.* Acesso ao espaço aéreo brasileiro por aeronaves não tripuladas. Revista do CIAAR, v. 1, n. 1, 2020.

SOLERA, M. L. Seleção de espécies vegetais para pelletização de sementes com aplicabilidade na recuperação de áreas degradadas pela mineração. Revista IPT: Tecnologia e Inovação, v. 6, n. 19, 2022.

TOUMEY, J.W.; KORSTIAN, C. F. Seeding and planting in the practice of forestry. New York: John Wiley, 1967, pt.2, cap.6, p.205-218.

XFLY TECNOLOGIA, 2022. Especificações técnicas. Disponível em: <www.xflytecnologia.com.br>. Acesso em julho de 2022.

YOUNG, T. P. Restoration ecology and conservation biology. Biological conservation, v. 92, n. 1, p. 73-83, 2000.

ZHENG, FENLI *et al.* Effects of erosion patterns on nutrient loss following deforestation on the Loess Plateau of China. Agriculture, ecosystems & environment, v. 108, n. 1, p. 85-97, 2005.