

HENRIQUE NEYFFER DE SOUZA

**AVALIAÇÃO DE SISTEMAS MECANIZADOS PARA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO
EM PLANTIOS DE EUCALIPTO DE ÁREAS MONTANHOSAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Marconi Ribeiro Furtado Júnior

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S729a
2023

Souza, Henrique Neyffer de, 1989-

Avaliação de sistemas mecanizados para aplicação de calcário em plantios de eucalipto em áreas montanhosas / Henrique Neyffer de Souza. – Viçosa, MG, 2023.

1 dissertação eletrônica (85 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Marconi Ribeiro Furtado Junior.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola, 2023.

Referências bibliográficas: f. 68-80.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.680>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Plantio de florestas. 2. Mecanização agrícola.
3. Eucalipto. 4. Plantas - Efeito do cálcio. I. Furtado Junior, Marconi Ribeiro, 1987-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. III. Título.

CDD 22. ed. 634.92


HENRIQUE NEYFFER DE SOUZA

**SISTEMAS MECANIZADOS PARA APLICAÇÃO DE CALCÁRIO EM PLANTIOS
DE EUCALIPTO DE ÁREAS MONTANHOSAS**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 29 de julho de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 HENRIQUE NEYFFER DE SOUZA
Data: 27/10/2023 10:20:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Henrique Neyffer de Souza
Autor

Documento assinado digitalmente
 MARCONI RIBEIRO FURTADO JUNIOR
Data: 30/10/2023 08:51:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Marconi Ribeiro Furtado Júnior
Orientador

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e paz.

A minha família, especialmente a minha esposa Alessandra, obrigado pela paciência nas ausências, pelos estímulos e forças dadas para a vitória neste desafio. Para a minha família que nasceu, seja bem-vinda a este mundão.

A CENIBRA pelo apoio e incentivo para realização do trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Agrícola, especialmente ao meu orientador, professor Marconi, pela oportunidade e colaboração durante todo este período.

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

RESUMO

SOUZA, Henrique Neyffer, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2023. **Avaliação de sistemas mecanizados para aplicação de calcário em plantios de eucalipto de áreas montanhosas.** Orientador: Marconi Ribeiro Furtado Júnior.

O eucalipto é considerado uma cultura tolerante à acidez do solo, porém, com produtividade dos plantios influenciada pela disponibilidade nutricional nos solos, em especial, dos nutrientes cálcio (Ca) e magnésio (Mg). Nos últimos anos, várias máquinas têm sido desenvolvidas para permitir a aplicação mecanizada de fontes destes nutrientes de em terrenos com alta inclinação, onde além de precisar vencer os obstáculos do relevo, precisam garantir a qualidade da aplicação do produto. Diante do abordado, o objetivo principal deste trabalho foi avaliar a uniformidade da distribuição mecanizada de calcário em áreas montanhosas com utilização de sistemas mecanizados de discos centrífugos e pneumáticos, bem como determinar o efeito da inclinação do terreno e do sentido longitudinal de deslocamento de conjuntos mecanizados sobre a uniformidade da distribuição de calcário. Os sistemas mecanizados selecionados foram M1 (Trator agrícola com distribuidor centrífugo), M2 (Trator florestal com distribuidor centrífugo) e M3 (Trator agrícola com distribuidor pneumático). Os equipamentos foram avaliados em faixas de inclinação variando de 0 a 40°, em posições longitudinais subindo e descendo. A avaliação da distribuição transversal mostrou que cada sistema mecanizado apresenta diferentes resultados quanto a variáveis como coeficiente de variação (CV), atingimento da dose esperada e simetria, sendo que os resultados foram piores que a maioria das referências técnicas. A inclinação foi altamente determinante para a uniformidade de distribuição. O sentido de aplicação não afetou de forma significativa a variância, porém afetou a dose aplicada. Aplicações descendo apresentaram 21% a mais de calcário que aplicações subindo. O sistema pneumático M3 apresentou resultados fora dos limites em todas as combinações de inclinação e sentido. O conjunto M1 foi o mais homogêneo. Os resultados inferiores à agricultura eram esperados visto que, operações de campo, com influência de vento e em solos irregulares tendem a produzir padrões mais variáveis de faixa de aplicação. O trabalho atingiu os objetivos de trazer conhecimento científico sobre as novas tecnologias utilizadas no meio

florestal para avanço da mecanização em terrenos montanhosos, gerando subsídios para melhorias e garantia de viabilidade técnica e econômica da operação.

Palavras-chave: Mecanização. Terrenos inclinados. Fertilização florestal. Padrão de aplicação.

ABSTRACT

SOUZA, Henrique Neyffer, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2023. **Evaluation of mechanized systems for lime spreading on eucalyptus planting in mountains areas.** Adviser: Marconi Ribeiro Furtado Júnior.

The eucalyptus is considered a crop tolerant to soil acidity, however, with productivity of plantations is highly influenced by the nutritional availability in the soils, in special, of calcium (Ca) and magnesium (Mg) nutrients. In recent years, several machines have been developed to allow the mechanized application of sources of these nutrients in terrain with high slopes, where, in addition to having to overcome terrain obstacles, they need to guarantee the quality of the product application. In view of the above, the main objective of this work was to evaluate the uniformity of the mechanized distribution of lime in slope areas using mechanized systems of centrifugal disc and pneumatic spreaders, as well as to determine the effect of the slope of the field and the longitudinal direction of movement of mechanized sets. on the uniformity of lime distribution. The selected mechanized systems were M1 (Agricultural tractor with centrifugal spreader), M2 (Forestry tractor with centrifugal spreader) and M3 (Agricultural tractor with pneumatic spreader). The equipment was evaluated in inclination ranges ranging from 0 to 40°, in longitudinal positions uphill and downhill. The evaluation of the transverse distribution showed that each mechanized system presents different results regarding variables such as coefficient of variation (CV), achievement of the expected dose and symmetry, being that the results were worse than most of the technical references. The slope was highly determinant for the uniformity of distribution. The direction of application did not significantly affect the variance, but it did affect the applied dose. Downhill applications had 21% more limestone than uphill applications. The M3 pneumatic system showed out-of-limits results in all slope and direction combinations. Set M1 was the most homogeneous. Lower results than agriculture was expected since field operations, with wind influence and on irregular soils tend to produce more variable patterns of application. The work achieved the objectives of bringing scientific knowledge about the new technologies used in the forest environment to advance mechanization in slope terrain, generating subsidies for improvements and guaranteeing the technical and economic viability of the operations.

Keywords: Mechanization. Steep terrain. Forest fertilization. Pattern spreading.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pilares da tecnologia de aplicação de fertilizantes agrícolas	16
Figura 2 - Produtividade de plantios de eucalipto vs aplicação de calcário.....	20
Figura 3 - Classificação granulométrica de fertilizantes e corretivos.....	25
Figura 4 - Trator florestal Forwarder com distribuidor centrífugo para carvão vegetal fino	27
Figura 5 - Aplicação manual de calcário	28
Figura 6 - Distribuição de fertilizantes em faixas em cultivos perenes	31
Figura 7 - Dispersão de Ca e Mg na camada de solo após aplicação de calcário	31
Figura 8 - Diferentes padrões de distribuição de insumos a lanço	33
Figura 9 - Esquema de distribuição de sistemas de adubação de calcário	38
Figura 10 - Distribuidor de calcário de arraste com discos centrífugos realizando aplicação em área florestal.....	39
Figura 11 - Trator florestal realizando aplicação de calcário	40
Figura 12 – Exemplo de distribuidor de calcário pneumático com deslocamento em estrada e aplicação dentro do talhão	41
Figura 13 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator agrícola com distribuidor centrífugo	43
Figura 14 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator florestal com distribuidor centrífugo	44
Figura 15 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator agrícola com distribuidor pneumático	44
Figura 16 - Esquema ilustrativo de sentido de movimentação de uma máquina no terreno	47
Figura 17 - Efeito do vento sobre a distribuição de calcário	49
Gráfico 1 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M1	50
Gráfico 2 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M2.....	50
Gráfico 3 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M3.....	51
Gráfico 4 - Coeficiente de variação x Tipo de conjunto mecanizado.....	55
Gráfico 5 - Simetria da faixa de aplicação por tipo de máquinas.....	57
Gráfico 6 - Dose aplicada por tipo de máquina	57
Gráfico 7 - Coeficiente de variação x Inclinação do terreno	58

Gráfico 8 - Comportamento do conjunto mecanizado para cada faixa de inclinação	59
Gráfico 9 - Simetria x Faixa de inclinação	59
Gráfico 10 - Simetria x Inclinação e Máquina.....	60
Gráfico 11 - Atingimento de dose x Inclinação e máquina	60
Gráfico 12 - Coeficiente de variação x Sentido de operação	61
Gráfico 13 – Simetria x Sentido de operação	61
Gráfico 14 - Dose média e atingimento de dose x Sentido de operação.....	62
Gráfico 15 - Resultados de Coeficiente de Variação (%) x Tratamento	63
Gráfico 16 - Resultados de Atingimento de dose (%) x Tratamento.....	63
Gráfico 17 - Resultados de Simetria x Tratamento.....	63
Gráfico 18 - Correlação entre CV% e Atingimento de dose esperada	65
Gráfico 19 - Correlação entre CV% e Simetria.....	65
Gráfico 20 - Correlação entre Simetria e Atingimento de dose esperada	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de disponibilidade de nutrientes no solo para a cultura do eucalipto.....	18
Tabela 2 - Classes de relevo com base na inclinação (°).....	21
Tabela 3 – Referências de distribuição de calcário mecanizada.....	34
Tabela 4 - Proporção de área plantada por faixa de inclinação	36
Tabela 5 - Histórico de média de velocidade máxima de vento (km.h ⁻¹) nas áreas da empresa do experimento.....	37
Tabela 6 - Posicionamento dos sistemas mecanizados para realização das aplicações em função da inclinação da área aplicada	46
Tabela 7 - Relação de tratamentos realizados durante os experimentos de campo .	48
Tabela 8 - Resultados médios de cada experimento	52
Tabela 9 - Análise de variância para dados normalizados de Coeficiente de Variação, Dose aplicada e Atingimento de dose.	52
Tabela 10 - Resultados experimentais x Limites técnicos recomendados	54
Tabela 11 - Largura efetiva de trabalho (m) simulada em função do limite de CV	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ca	-	Cálcio
CV	-	Coeficiente de variação (%)
EUA	-	Estados Unidos da América
Mg	-	Magnésio
LiDAR-		<i>Light Detection and Ranging</i>
TDA	-	Tração Dianteira Auxiliar

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	14
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	O Alvo.....	16
2.2.	O Ambiente.....	20
2.3.	Os Produtos.....	23
2.4.	As Máquinas.....	26
2.4.1.	Fonte de potência	26
2.4.2.	Mecanismos dosadores	28
2.4.3.	Mecanismos distribuidores.....	29
2.4.4.	Posicionamento do fertilizante ou corretivo.....	30
2.5.	Qualidade de aplicação	32
3.	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1.	Caracterização da área de estudo.....	36
3.2.	Máquinas e equipamentos utilizados.....	37
3.2.1.	M1 – Trator agrícola + Distribuidor centrífugo.....	38
3.2.2.	M2 – Trator florestal + Distribuidor centrífugo	40
3.2.3.	M3 – Trator agrícola + Distribuidor pneumático	41
3.3.	Avaliação da qualidade de aplicação	42
3.4.	Avaliação do efeito da inclinação	46
3.5.	Avaliação do efeito do sentido de posicionamento do distribuidor	46
3.6.	Delineamento experimental.....	47
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Caracterização dos ensaios de campo.....	49
4.2.	Distribuição ao longo da faixa.....	49
4.3.	Avaliação de padrão de distribuição.....	51
4.3.1.	Máquinas para aplicação de calcário	53
4.3.2.	Inclinação do terreno.....	58
4.3.3.	Sentido de aplicação	61
4.3.4.	Correlação entre variáveis	64
5.	CONCLUSÃO.....	67
6.	REFERÊNCIAS.....	68
7.	APÊNDICE	81

7.1. Padrão médio de distribuição para cada tratamento	81
--	----

1. INTRODUÇÃO

A cultura de eucalipto é conhecida por ser tolerante à acidez do solo, porém, a produtividade dos plantios é altamente influenciada pela disponibilidade dos nutrientes cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019). Nos plantios brasileiros, estes nutrientes são fornecidos principalmente pela aplicação de gesso, calcário (MACANA et al., 2022) e cinza (BAUER; SZOGI; SHUMAKER, 2019). Considerando que a resposta em produtividade ($m^3 \cdot ha^{-1}$) de plantios de eucalipto à aplicação de Ca e Mg pode variar de 4 a 62% (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019), a desuniformidade de distribuição do insumo pode trazer grandes impactos ao crescimento das árvores.

Em regiões montanhosas onde a inclinação do terreno supera o limite de 15-20°, a aplicação de calcário é feita majoritariamente de forma manual (SOUZA, 2014), já que nessas inclinações, tratores agrícolas não conseguem operar com segurança (HALL; JAMIESON; BYATTZ, 1997; LEITE, 2007; MURPHY; BEPPLER; SOMMER, 1985). Nos últimos anos, várias máquinas têm sido desenvolvidas para permitir a operação em terrenos com alta inclinação, onde além de precisar vencer os obstáculos do relevo, precisam garantir a qualidade da aplicação do produto.

A aplicação de fertilizantes e corretivos em terrenos inclinados é pouco estudada já que as culturas agrícolas são principalmente cultivadas em terrenos planos e levemente ondulados (BARROS et al., 2019; GODOY; LOPES-ASSAD, 2002). Nos poucos trabalhos existentes (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017; SPAGNOLO et al., 2021), percebe-se efeito direto do aumento ou variação da inclinação sobre a quantidade de insumo aplicada e sobre a qualidade desta aplicação. Outro fator que afeta a qualidade da aplicação é o próprio local de operação, já que de acordo com Parish (1991), as irregularidades da superfície podem até dobrar a variabilidade da distribuição. Ao se considerar terrenos florestais, em que os galhos, cascas e folhas do ciclo de plantio anterior permanecem no solo, as máquinas que operam nestas condições tendem a enfrentar maiores dificuldades durante o deslocamento, podendo comprometer a qualidade da aplicação.

Os tipos e configurações do maquinário utilizado para aplicação também afetam o resultado da operação. Os principais métodos utilizados para a aplicação mecanizada de calcário são com tratores agrícolas acoplados com equipamentos que apresentam mecanismos distribuidores do tipo discos centrífugos (CUNHA; SOARES,

2016). Nestes equipamentos, diversos fatores que afetam a qualidade da aplicação tem sido intensamente estudados (ANDRADE et al., 2020; KHUDHER; HIMOUD; ALMALIKI, 2020; KIM; WOO; KIM, 2018; LAGHARI et al., 2014; SAGRILLO et al., 2019; SPAGNOLO et al., 2021; WERNER et al., 2007), porém, a aplicação de produtos em pó é um assunto que carece de mais estudos, já que a aplicação de corretivos de acidez do solo ou fertilizantes em pó, não é uma prática comum em todos os países.

A maioria dos estudos pertinentes a mecanismos de fertilização são focados em distribuidores com discos centrífugos, pois de acordo com Khudher; Himoud; Almaliki (2020), em muitos países, mais de 90% dos fertilizantes são aplicados utilizando estes tipos de equipamentos. Em virtude disso, a literatura científica dispõe de pouca informação sobre outros mecanismos de aplicação de fertilizantes e corretivos como o mecanismo pneumático, o que gera uma demanda de conhecimento ainda não suprida. Pode-se observar que o comportamento da aplicação de calcário em terrenos com inclinação acentuada (20-45°) e com diferentes mecanismos de distribuição que não sejam discos centrífugos, precisa ser melhor entendido para garantir que as aplicações tenham o padrão esperado e não prejudiquem o desenvolvimento das culturas instaladas.

Diante do abordado, o objetivo principal com a realização deste trabalho é avaliar a uniformidade da distribuição mecanizada de calcário em áreas montanhosas com utilização de sistemas mecanizados de discos centrífugos e pneumáticos, bem como determinar o efeito da inclinação do terreno e do sentido longitudinal de deslocamento de conjuntos mecanizados sobre a uniformidade da distribuição de calcário.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Sistemas mecanizados de aplicação de fertilizantes podem ser caracterizados a partir de quatro principais pilares relacionados a Tecnologia de Aplicação: *Alvo*, *Ambiente*, *Máquinas* e *Produtos* (Figura 1). A avaliação criteriosa de todos esses elementos durante a fase de planejamento de operações, aumenta a chance de sucesso da atividade, maximizando os ganhos produtivos, reduzindo gastos e impactos ao ambiente.

Figura 1 - Pilares da tecnologia de aplicação de fertilizantes agrícolas



Fonte: O Autor

2.1. O Alvo

“Eucalipto” é o termo genérico comumente utilizado para referenciar as espécies do gênero *Eucalyptus* e parte das espécies do gênero *Corymbia* (MACPHAIL et al., 2016). Esses gêneros pertencem a família Myrtacea e tem suas origens em países da Oceania, principalmente Austrália, Papua-Nova-Guiné, Indonésia e Filipinas (ROZEFELDS, 1996). Apenas o gênero *Eucalyptus* apresenta mais de 700 espécies (WILTSHIRE, 2004), que nas últimas décadas, passaram a ser cultivadas em diversas partes do mundo. As principais espécies de *Eucalyptus* cultivadas nas regiões tropicais são *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. saligna*, *E. cloeziana*, *E. tereticornis*, *E. pellita* (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019) e *E. globulus* (CANNELL, 2004).

No Brasil, o primeiro eucalipto foi plantado no Jardim Botânico do Rio de Janeiro em 1824 (MARCHIORI, 2014; QUEIROZ; BARRICHELO, 2007). Em 1904, passou a

ser estudado pelo pioneiro Edmundo Navarro de Andrade como alternativa para produção de madeira para as ferrovias do estado de São Paulo (SAMPAIO, 1961). Porém, foi na década de 60, através do programa de benefícios fiscais concedido pelo governo federal, que as plantações de eucalipto começaram a ocupar os diversos estados brasileiros (GONÇALVES et al., 2013). Atualmente, de acordo com IBÁ (2022), a área de cultivo com diversas espécies de eucalipto no Brasil ocupa 7,53 milhões de hectares, estando concentradas principalmente nos estados de Minas Gerais (30%), Mato Grosso do Sul (14%) e São Paulo (13%).

Em relação aos solos utilizados para plantios de eucalipto no Brasil, os principais tipos são os Latossolos (47,9%), Argissolos (25,5%) e Cambissolos (14%) (GONÇALVES et al., 2013). Estes variados tipos de solos apresentam uma grande variedade de propriedades físicas e elevada variabilidade nutricional natural. A variabilidade nutricional é dada pela concentração dos vários elementos químicos que são essenciais para o crescimento das plantas ali estabelecidas (LAGHARI et al., 2014).

Elementos químicos são considerados nutrientes essenciais ou benéficos quando o ciclo de vida de uma planta não se completa na ausência deste elemento, sendo assim chamado de *essencial*; ou a escassez provoca deficiência no crescimento ou redução de atributos de qualidade da planta, sendo assim chamado de *benéfico* (BROWN; ZHAO; DOBERMANN, 2022). Destes elementos minerais, se destacam os chamados macronutrientes (P, K, N, S, Ca, Mg) e os micronutrientes (Cu, Fe, Zn, B, Mo, Mn, Cl), agrupados em função da quantidade relativa necessária para a planta (ZEKRI; OBREZA, 1969).

Outra propriedade do solo importante para a agricultura refere-se a *Acidez*. A acidez de um solo, medida pela escala pH, indica a concentração de íons H⁺ na solução deste solo, onde valores mais baixos de pH representam solos mais ácidos e valores mais altos de pH representam solos mais básicos ou alcalinos (GAZEY; DAVIES, 2009). Na presença de solos com menor pH, o elemento não essencial alumínio que é um elemento presente no solo em diferentes formas químicas, passa a se apresentar solúvel.

Concentrações de alumínio na solução do solo superiores a 5 mg.kg⁻¹ ou 5 ppm são consideradas tóxicas mesmo para espécies vegetais tolerantes. A concentração de alumínio a níveis tóxicos afeta os processos de divisão celular das plantas e a habilidade de alongamento das raízes, com isso, afetando o crescimento da planta

(GAZEY; DAVIES, 2009). Em contrapartida, condições de elevado pH afetam a solubilidade de nutrientes e influenciam nos mecanismos de absorção e precipitação de nutrientes contendo Al, Mn e Fe (CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006).

A cultura do eucalipto é considerada como relativamente tolerante a acidez do solo (GONÇALVES et al., 2013; IKKA et al., 2013; NGUYEN et al., 2003; SYMONDS; CAMPBELL; CLEMENS, 2001). Por isso, as aplicações de produtos chamados de corretivos como calcário e similares, tem a finalidade principal de atuar como fertilizante fornecedor dos nutrientes cálcio e magnésio, e não como agente redutor do pH do solo (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019).

De acordo com (GONÇALVES, 2011), para plantios de eucalipto, o teor de alguns nutrientes disponíveis no solo pode classificadas conforme a Tabela 1. Em condições de baixa disponibilidade, os sintomas de deficiência para o nutriente *cálcio* incluem a má formação de paredes celulares que provocam o encarquilhamento de folhas jovens e ocorrência de necroses. O crescimento de gemas e raízes também é prejudicado. Para o nutriente magnésio, a deficiência pode ser observada em folhas velhas caracterizadas por clorose, amarelecimento ou descoloração dos nervos foliares (DELL et al., 2000). Gonçalves (2011) conclui que se espera alta resposta a suplementação pela fertilização apenas em solos com níveis baixos dos nutrientes Ca e Mg, sendo que solos com níveis altos ou médio, podem não responder a fertilização adicional.

Tabela 1 - Classificação de disponibilidade de nutrientes no solo para a cultura do eucalipto.

Nível	Nutriente	
	Ca (cmol _c dm ⁻³)	Mg (cmol _c dm ⁻³)
Baixo	0,0-0,4	0,0-0,2
Médio	0,4-0,7	0,3-0,4
Alto	>0,7	>=0,5

Fonte: Gonçalves (2011)

No Brasil, os solos utilizados para plantios de eucalipto são tipicamente ácidos, porém com teores nutricionais bastante diversos nas camadas superiores do perfil do solo (BINKLEY et al., 2017; MATOS et al., 2012; ZAIA; GAMA-RODRIGUES, 2004). Apesar disso, observa-se uma maior ocorrência de plantios em terrenos com baixa disponibilidade natural de Ca²⁺ e Mg²⁺ demonstrando a necessidade de reposição através da fertilização mineral suplementar.

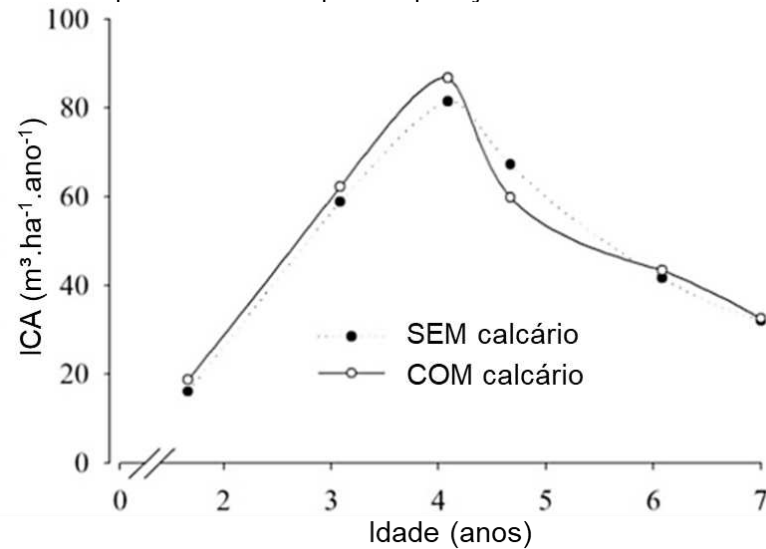
A exemplo de países como a Espanha, os solos destinados a plantios florestais são tipicamente fortemente ácidos e com baixos níveis de nutrientes como Ca, Mg, K

e P, que por sua vez, produzem plantas com considerável deficiência nutricional destes mesmos nutrientes (MERINO et al., 2003). Esse processo de deficiência nutricional é intensificado pela retirada de madeira durante operações de desbaste e colheita (DELL et al., 2000), sendo altamente influenciado pelo sistema de colheita utilizado. Em sistemas chamados de *full-tree*, onde as árvores são derrubadas dentro do talhão e processadas fora do talhão ou na borda do mesmo, ocorre a retirada de cascas, galhos e folhas das árvores do talhão junto com a madeira (ZASADA; TAPPEINER, 1969).

O sistema chamado de *cut-to-length* é caracterizado pela utilização de máquinas para corte, derrubada, desgalha, descasque, traçamento em toretes de medidas pré-definidas, todas dentro do campo, para posterior retirada apenas da madeira para borda da estrada (DAYSTAR et al., 2015). Neste sistema em que as árvores são derrubadas e processadas dentro do talhão, cascas, galhos e folhas não são removidos (GELLERSTEDT; DAHLIN, 1999). As cascas e folhas são conhecidamente ricos em nutrientes como P, K, Ca, N (MERINO et al., 2003) e Mg (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019), logo, a retirada destes materiais de dentro dos talhões implica em acentuação do déficit nutricional destes solos (KIMMINS, 1976; WEETMAN; WEBBER, 1972).

Devido as características dos solos utilizados para plantio de eucaliptos, estudos demonstram que a resposta em produtividade ($m^3.ha^{-1}$) à aplicação de Ca e Mg (Figura 2) pode variar de 4 a 62% (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019). Com isso, fornecer a dose correta é imprescindível para o sucesso do empreendimento já que fatores como a desuniformidade de distribuição do insumo podem trazer grandes impactos ao crescimento das árvores.

Figura 2 - Produtividade de plantios de eucalipto vs aplicação de calcário



Em que: ICA = Incremento Corrente Anual. Fonte: Adaptado de Rocha; Du Toit; Gonçalves (2019).

2.2. O Ambiente

Entre os fatores determinantes da influência do ambiente sobre a distribuição mecanizada de determinado insumo, destacam-se as condições do terreno e condições climáticas. O *Terreno* afeta por meio de suas características de inclinações transversal e longitudinal, uniformidade de superfície como ausência/presença de microrelevos (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017) e por fim, pela interação com características da cultura alvo como porte das plantas, alinhamento e espaçamento.

O relevo pode receber diferentes classificações quanto a inclinação a depender dos objetivos e aplicações dos estudos a que são objetos (Tabela 2). A maioria das terras cultiváveis brasileiras estão localizadas em topografias classificadas como planas que dentre outras características, apresentam maior capacidade de sustentação de máquinas, permitindo a mecanização generalizada (RAMALHO FILHO; BEEK, 1994).

Tabela 2 - Classes de relevo com base na inclinação (°)

Fonte	INCLINAÇÃO (°)																																											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
A	Plano		Suave ondulado			Ondulado					Forte ondulado								Montanhoso								Escarpado																	
C	Plano	Suave ondulado	Ondulado	Muito inclinado	Fortemente ondulado												Montanhoso								Escarpado																			
B	Plano				Suave				Médio				Inclinado				Muito inclinado				Excessivo				Extremo																			
D	Plano	Levemente inclinado	Ondulado	Inclinado	Montanhoso								Íngreme								Muito íngreme																							

Fonte: A - EMBRAPA (2018); B - Lepsch et al. (1991); C - Murphy; Beppler; Sommer (1985); D - Soil Science Division Staff (2017).

Para o setor florestal, em um levantamento de 2011, Gonçalves et al. (2013) estimam que mais de 93% dos plantios florestais brasileiros estavam concentrados em inclinações entre 0 e 16,7°. Entretanto, Wichert et al. (2018) destacam o avanço de plantios de eucalipto em áreas montanhosas como alternativa de substituição de pastagens degradadas e melhor oportunidade de ganhos financeiros para o produtor rural. Confirmando essa hipótese, Silva et al. (2014) afirmam que as áreas utilizadas para plantios de eucalipto tendem a ser aquelas concentradas em ecossistemas sensíveis, como relevo acidentado, solos com baixa fertilidade natural e áreas degradadas.

Em operações agrícolas, a inclinação do terreno é um dos grandes fatores mais limitantes para mecanização, principalmente devido ao aumento do risco de acidentes (MASHADI; NASROLAHI, 2009). Murphy; Beppler; Sommer (1985), em uma escala de inclinação versus estabilidade de máquinas afirmam que a partir de 20°, tratores agrícolas 4x2 ou 4x2 com tração dianteira auxiliar (TDA) tornam-se instáveis no solo independentemente do tipo de equipamento utilizado (montado ou de arraste). De acordo com Pereira; Fiedler; Lima (2011), em áreas florestais, o limite de inclinação lateral ou transversal para a atividade de subsolagem-adubação com tratores de pneu é de 23,7°. Já para Hall; Jamieson; Byattz (1997), esse limite não passa de 20°. Segundo Souza (2014), apenas utilizando tratores de esteira foi possível atingir inclinações de até 25° na aplicação de calcário e adubos em áreas florestais.

Além da inclinação, fatores técnicos, econômicos e ambientais afetam o avanço da mecanização (ALMADO, 2013). Em um levantamento de 2020, Guerra; Oguri; Maschetti (2020) identificaram que mais 80% das atividades de adubação em áreas florestais do Brasil são realizadas de forma mecanizada com uso de tratores e equipamentos, corroborando a atual distribuição de plantios florestais em terras consideradas mais planas estimada por Gonçalves et al. (2013).

No que se refere a aplicação mecanizada de fertilizantes granulares, existem diversos modelos matemáticos que simulam o padrão de distribuição deste insumo (COETZEE; LOMBARD, 2011; COOL et al., 2017; DINTWA et al., 2004; HIJAZI et al., 2014; KOKO; VIRIN, 2009; OLIESLAGERS; RAMON; DE BAERDEMAEKER, 1996; VAN LIEDEKERKE et al., 2008). Estes modelos baseiam-se na análise da projeção das partículas do insumo a partir de parâmetros como posição inicial, direção, velocidade e dimensões da partícula.

Essas variáveis são utilizadas em modelos balísticos para estimar a posição da partícula sob o solo após a aplicação (COOL et al., 2016b). Porém, apesar de utilizarem diferentes abordagens de dinâmicas dos insumos sólidos e relação com as partes mecânicas do mecanismo distribuidor, estes modelos são previamente concebidos para áreas regulares e planas. Considerando que as áreas cultiváveis estão distribuídas em diferentes formações topográficas e inclinações, isso representa uma defasagem de conhecimento (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017) e um distanciamento entre teoria e prática. Além disso, vários dos modelos retornam valores medidos diferentes daqueles estimados (REUMERS; TIJSKENS; RAMON, 2003b; VAN LIEDEKERKE et al., 2009), mesmo considerando aplicações em condições ideais de laboratório.

Dentre as características que acentuam a discrepância entre as pesquisas disponíveis na literatura e as condições reais de campo, Abbou-Ou-Cherif et al. (2017) ressaltam a escassa ocorrência de estudos em superfícies não planas. Um exemplo desses poucos trabalhos foi desenvolvido por Grafton et al. (2015) que obtiveram crescentes valores de coeficiente de variação (CV) em terrenos com inclinação frontal e lateral. Os mesmos autores identificaram que quando aplicando em uma subida, a taxa de aplicação pode ser até 50% maior que a aplicação na descida com o equipamento nas mesmas condições. Ao avaliar em laboratório, diferentes tipos de dosadores para aplicação de fertilizantes granulares, Garcia et al. (2017); Spagnolo et al. (2021) encontraram relação positiva e direta entre variação da dosagem e inclinação, ou seja, maiores inclinações resultaram em maior variabilidade de adubo aplicado.

A uniformidade da distribuição de insumos também é afetada por características que causam uma irregularidade do terreno como variabilidade de inclinação de encostas e vales (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017; GRAFTON et al., 2015), obstáculos e alterações de solo como linhas de drenagem "*humps and hollows*"

(HORROCKS et al., 2015). Em complemento, Parish (2003); Yildirim (2008) perceberam acentuados valores de CV ao avaliarem aplicações em diferentes alturas em relação ao solo.

Outros fatores de interferência na uniformidade de distribuição de insumos são as características da cultura como alinhamento, porte, altura (BAIO; MOLIN; LEAL, 2012) e distância entre fileiras de plantas. Parish (1991) destaca também o efeito da superfície do solo sobre a variabilidade da distribuição, onde terrenos irregulares geraram um CV de até 30% comparado com superfícies macias e regulares que o valor ficou abaixo dos 10%.

Dentre as características climáticas, a que mais afeta o padrão de distribuição de insumos é o vento (MÁRQUEZ, 2001). De acordo com Baio; Molin; Leal (2012); Cool et al. (2016b), o vento atua pelo efeito de arraste do produto alterando a faixa, simetria de aplicação e padrão de distribuição. Esse efeito é acentuado pela granulometria do produto onde partículas menores são as mais afetadas (COOL et al., 2016a). De acordo com Silveira et al. (2017), velocidade de vento superiores a 3,24 km.h⁻¹ resultaram em padrões de distribuição com valores de CV superiores a 66% ao utilizar calcário a 10% de umidade, demonstrando a baixa qualidade da aplicação sobre condições de elevada velocidade de vento. Outra característica climática refere-se a umidade do ar, onde excesso de umidade pode promover a hidratação de fertilizantes alterando a fluidez do produto e conseqüentemente, dificultando a operação (ALMEIDA, 2018).

2.3. Os Produtos

Corretivos agrícolas são basicamente materiais “que contenham substâncias capazes de corrigir uma ou mais características desfavoráveis às plantas de interesse” (BALASTREIRE; COELHO, 2000, p. 11). Em solos agrícolas, a ocorrência de elevada acidez do solo é altamente prejudicial a maioria das culturas agrícolas (SINGH et al., 2017) e por isso, a aplicação de materiais corretivos é uma prática globalmente utilizada (VARGAS et al., 2019). Os principais exemplos de produtos corretivos de acidez do solo são as rochas carbonáticas, com destaque para calcita e dolomita (GRUNWALDT et al., 2016; MORSE; ARVIDSON, 2002).

Os ânions resultantes da dissociação dos produtos corretivos de acidez (HCO_3^- e OH^-) reagem com os prótons da solução do solo, resultando na neutralização do Al^{3+} presente nos solos ácidos. Entretanto, como a dissociação do corretivo depende da presença de prótons do solo, as reações químicas esperadas são limitadas pelo contato entre solo e produto corretivo (KAMINSKI et al., 2005; WEIRICH NETO et al., 2000). Essa premissa implica que a boa efetividade de um corretivo está associada a boa qualidade de distribuição e dispersão das partículas corretivas ao longo de toda camada do solo.

Como a produtividade dos plantios de eucalipto é altamente influenciada pela disponibilidade dos nutrientes Ca e Mg (ROCHA; DU TOIT; GONÇALVES, 2019), a complementação via fertilização é realizada, nos plantios brasileiros, principalmente pela aplicação de gesso, calcário e cinza. Dentre essas fontes, o calcário tem sido preferencialmente utilizado como fonte nutricional devido o menor custo (RODRIGUES et al., 2016). Nestas condições, os típicos produtos corretivos atuam como fertilizantes, que por definição, representam uma “substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes para as plantas” (BALASTREIRE; COELHO, 2000, p. 12).

De acordo com Reetz Jr (2017), o elemento cálcio é absorvido pela planta na forma iônica Ca^{2+} , tendo como principais fontes o feldspato, augita, homblenda, carbonato de cálcio (CaCO_3) e sulfato de cálcio (CaSO_4). Para o nutriente magnésio, a forma iônica é o Mg^{2+} , sendo que as fontes mais importantes são a augita, homblenda, olivina, biotita e carbonato de magnésio (MgCO_3).

Após a aplicação do calcário, dois fatores são altamente impactantes sobre os mecanismos físico-químicos de dispersão e interação das partículas com o solo e planta: tempo e taxa de infiltração de água. O calcário é um produto de baixa solubilidade, de forma que é necessário um longo tempo para a dissolução completa do produto aplicado. Já a taxa de infiltração de água, impacta diretamente no transporte de partículas do produto para camadas inferiores do solo, na taxa de dissolução de partículas do calcário e conseqüentemente, na interação com ácidos e outros elementos do solo (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

Enquanto a baixa solubilidade do calcário pode ser considerada como um obstáculo para culturas agrícolas, torna-se um elemento favorável para culturas florestais que tradicionalmente utilizam longos ciclos de cultivo. Estudos de longa duração (maior que 4 anos) sobre o efeito da aplicação superficial de calcário em solos

ácidos, demonstraram conservação dos novos teores de Mg e Ca após a aplicação do fertilizante, perdurando ao longo de vários anos (CAIRES et al., 2015; CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006; VARGAS et al., 2019).

Para a aplicação mecanizada de fertilizantes e corretivos, as principais propriedades ou características físicas dos insumos que influenciam no resultado da aplicação são a estado físico, granulometria, dureza dos grânulos, fluidez ou escoabilidade, densidade, higroscopicidade e empedramento (LUZ et al., 2010; SENAR, 2020), teor de umidade e formato (GEORGE, 2007). Yule; Grafton (2016) complementam a importância de outros fatores associados às características do material a ser aplicado, como variabilidade de produtos (dimensões, densidades, concentrações etc.), ocorrência de misturas quimicamente reativas e incompatibilidade de propriedades balísticas entre componentes do produto.

Os produtos a serem utilizados para fornecimento de Ca e Mg podem ser classificados quanto a granulometria conforme Figura 3. Para calcário, a granulometria está associada ao grau de moagem do produto, sendo que frações mais finas são mais reativas (VERLENGIA; GARGANTINI, 1972), enquanto frações mais grossas apresentam maior efeito residual (SENAR, 2020). De acordo com Sampaio; Almeida (2005), o calcário agrícola deve ter uma distribuição granulométrica abaixo de 1,7 mm (natureza física pó), com 70% abaixo de 0,833 mm e 50% menor que 0,295 mm. Quimicamente, os calcários podem ser classificados de acordo com a concentração de MgO sendo divididos em classes, sendo *calcítico* o calcário com teor de MgO menor que 5%, *magnésiano* quando a concentração está entre 5 e 12% e *dolomítico* quando esse valor é maior que 12% (MAEDA et al., 1996).

Figura 3 - Classificação granulométrica de fertilizantes e corretivos.

NATUREZA FÍSICA	ESPECIFICAÇÃO DE NATUREZA FÍSICA	GARANTIA GRANULOMÉTRICA	
		Peneira	Partículas Passantes
SÓLIDO	Granulado e Mistura de Grânulos	4,80 mm (ABNT 4)	95% mínimo
		2 mm (ABNT 10)	40% máximo
		1 mm (ABNT 18)	5% máximo
	Microgranulado	2,8 mm (ABNT 7)	90% mínimo
		1 mm (ABNT 18)	10% máximo
	Pó	2,0 mm (ABNT 10)	100%
		0,84 mm (ABNT 20)	70% mínimo
		0,3 mm (ABNT 50)	50% mínimo
	Farelado	4,80 mm (ABNT 4)	90% mínimo
		2,8 mm (ABNT 7)	80% mínimo
		0,50 mm (ABNT 35)	30% máximo
	Pastilha	Frações moldadas de formato e tamanho variáveis	

Fonte: MAPA (2018)

2.4. As Máquinas

As máquinas e equipamentos utilizados para aplicação de fertilizantes e corretivos podem ser agrupadas em função de suas Fontes de potência, Mecanismos dosadores, Mecanismos distribuidores (BALASTREIRE; COELHO, 2000) e quanto ao local de Posicionamento do fertilizante (FLORES, 2008).

2.4.1. Fonte de potência

Quanto a Fonte de potência, as máquinas podem utilizar Tração animal, ser do tipo Tratorizados ou Autopropelidos (BALASTREIRE; COELHO, 2000). As atividades tratorizadas são caracterizadas pela utilização de um trator que é responsável por fornecer potência para o acionamento do equipamento distribuidor de insumo, além de fornecer sustentação para o equipamento (BALASTREIRE, 1987).

Para aplicadores autopropelidos, o mais comum é o uso de veículos agrícolas para a aplicação de fertilizantes granulados (REYNALDO et al., 2016; SHUFA; SHIPING; XINGZHAO, 2012), porém também podem ser utilizados para aplicação de calcário (LUZ et al., 2010; SENAR, 2020).

Caminhões adaptados com distribuidores de fertilizantes e corretivos também têm sido utilizados com grande sucesso em muitos países a vários anos (LUZ et al., 2010; POST; MURRAY, 2019). Nesse aspecto, Yule; Grafton (2016) destacam a utilização de caminhões com tração 4x4 para aplicação de fertilizantes em áreas com inclinação até 20° na Nova Zelândia, porém demonstram preocupação com o índice crescente de tombamentos ocorridos na atividade.

Dentre outras fontes de potências baseadas em veículos autopropelidos, tratores florestais do tipo *Forwarder* são utilizados a muitos anos em países do norte e leste europeu para aplicação de cinza oriunda da queima da madeira como fertilizante alternativo (VESTERINEN, 2003). Por definição, um *forwarder* é um trator florestal projetado para extração de madeira do interior da floresta para pilhas montadas as margens das estradas (LEITE, 2012).

Para a aplicação de insumos, o sistema de guindaste próprio do trator e normalmente utilizado para auto carregamento de madeira, passa a ser responsável pelo autoabastecimento do reservatório do equipamento com o insumo a ser aplicado.

Para isso, a caixa de carga do *Forwarder* é normalmente substituída por um distribuidor de discos centrífugos (VÄÄTÄINEN et al., 2011). No EUA, *forwarders* adaptados são utilizados para aplicação de finos de carvão vegetal (Figura 4), onde apesar do aumento de compactação do solo (11%) pela passagem da máquina, o benefício obtido pela aplicação do subproduto, justifica a operação, mesmo em áreas planas (PAGE-DUMROESE et al., 2016).

Figura 4 - Trator florestal Forwarder com distribuidor centrífugo para carvão vegetal fino



Fonte: Page-Dumroese et al. (2016)

No Brasil, Curti; Costa (2013) relatam experiência de uma empresa florestal utilizando *forwarders* adaptados com distribuidor de discos centrífugos e distribuidor pneumático, mas que não foram continuados devido os custos elevados. Este tipo de maquinário apresenta grande potencial para operação em terrenos com elevadas inclinações, visto que na colheita florestal, operam normalmente em áreas com até 27° de inclinação, podendo chegar aos 40°, quando utilizando guincho auxiliar de tração (CASTILHO et al., 2014).

Considerando que a aplicação de calcário é majoritariamente feita de forma manual (Figura 5) em áreas com inclinação superior a 15-20°, a capacidade de trabalho deste equipamento em maiores inclinações vai de encontro a necessidade de mecanização das operações agrícolas frente a um cenário de crescente escassez de mão-de-obra rural (SOUZA, 2001; TRIOSCHI, 2012).

Figura 5 - Aplicação manual de calcário



Fonte: o Autor

2.4.2. Mecanismos dosadores

Mecanismos dosadores são aqueles componentes responsáveis pela “definição da dosagem do produto retirado do reservatório e liberação do mesmo para o mecanismo distribuidor” (BALASTREIRE; COELHO, 2000, p. 12). Os mecanismos dosadores empregados em distribuidores de fertilizantes e corretivos podem ser agrupados em dois grupos: *gravitacionais* e *volumétricos* (DUARTE, 2019; MACHADO et al., 1996). Nos dosadores gravitacionais o produto a ser aplicado não é removido forçadamente do reservatório, sendo assim, transferido pela ação da gravidade (PINHEIRO NETO; OLIVEIRA; CABELEIRO, 2000). Um exemplo deste sistema é utilizado em distribuidores centrífugos onde um ou mais orifícios com regulagens de abertura conectam o reservatório de insumo com os discos que realizam a dispersão do produto ao solo (COETZEE; LOMBARD, 2011; YINYAN et al., 2018). Entretanto, Coelho et al. (1992) demonstram deficiência deste tipo de dosador para aplicação de grandes vazões, comuns quando se trata de calcário e outros corretivos.

Nos dosadores volumétricos, o produto é removido continuamente do reservatório e conduzido até o mecanismo distribuidor por meio de esteiras (FARRET et al., 2008), helicoides (GALVÃO et al., 2018; GARCIA; CAPPELLI; UMEZU, 2012; ROSA et al., 2019), dentes ou rotores (LIPING; LIXIN; WEIQIANG, 2018; LV; YU; FU, 2013; RYU et al., 2006; SVENSSON, 1994). Para aplicação de calcário, os dosadores mais utilizados são os de esteiras ou correias transportadoras que são considerados

eficientes, com boa uniformidade e propícios para materiais como calcário e gesso (BALASTREIRE; COELHO, 2000). Normalmente são utilizados para aplicações de alta vazão (SRIVASTAVA et al., 2006) e apresentam elevada capacidade volumétrica variando de 2.500 a 15.000 dm³ (BALASTREIRE; COELHO, 2000). Nestes equipamentos, a vazão aplicada pode ser ajustada pela movimentação da comporta posicionada no fim do curso da esteira e que controla a saída de insumo do tanque para o mecanismo distribuidor (SRIVASTAVA et al., 2006).

2.4.3. Mecanismos distribuidores

Mecanismos distribuidores são aqueles responsáveis pela deposição do produto previamente dosado sobre a superfície a ser aplicada (BALASTREIRE; COELHO, 2000). Os principais tipos de mecanismos distribuidores são por Queda livre, Pendular ou inercial, Pneumático e Centrífugo (BALASTREIRE; COELHO, 2000; HACHUY, 2008). Nos distribuidores de *queda livre* não há lançamento do produto, sendo que a queda ocorre por simples força gravitacional e a faixa de aplicação é delimitada pela largura do equipamento (PINHEIRO NETO; OLIVEIRA; CABELEIRO, 2000). No mecanismo *pendular ou inercial*, o produto é lançado por tubo com movimento oscilatório horizontal (DUARTE, 2019).

Dentre os distribuidores de fertilizantes e corretivos, aqueles com mecanismos centrífugos são os mais utilizados (KHUDHER; HIMOUD; ALMALIKI, 2020; PRZYWARA et al., 2020; VAN LIEDEKERKE et al., 2008). Distribuidores centrífugos se caracterizam pela presença de rotores ou discos horizontais com aletas ou pás que ao girarem, realizam o lançamento radial do produto (HIJAZI et al., 2014). Eles são populares devido ao baixo custo e simplicidade de uso (COOL et al., 2016b; KWEON et al., 2009), robustez e elevada faixa de aplicação (OLIESLAGERS; RAMON; DE BAERDEMAEKER, 1996).

Para distribuidores de fertilizantes granulados de discos centrífugos, diversos fatores que afetam a qualidade da aplicação têm sido intensamente estudados. As configurações dos discos (KHUDHER; HIMOUD; ALMALIKI, 2020a; KIM; WOO; KIM, 2018; SAGRILO et al., 2019; YANG et al., 2019; YILDIRIM; KARA, 2012), posicionamento (PRZYWARA et al., 2020; REUMERS; TIJSKENS; RAMON, 2003a) e abertura da alimentação de fertilizantes sobre o disco (COETZEE; LOMBARD, 2011;

SHI et al., 2018). Também foram avaliados a velocidade de giro dos discos que interfere na balística de projeção das partículas e consequentemente no padrão de distribuição do insumo (ANDRADE et al., 2020; DINTWA et al., 2004; GANASCINI et al., 2016; OLIESLAGERS; RAMON; DE BAERDEMAEKER, 1996), os tipos de dosadores (SPAGNOLO et al., 2021), as características dos fertilizantes utilizados (PETTERSEN; SVENDSEN; ØVLAND, 1991; YULE, 2011), a velocidade de operação do trator (KHUDHER; HIMOUD; ALMALIKI, 2020a; LAGHARI et al., 2014; WERNER et al., 2007) e a dose aplicada (VILLETTE; PIRON; MICLET, 2017). A aplicação de produtos em pó como o calcário apresenta bem menos estudos (CUNHA; SOARES, 2016; GEORGE, 2007; HACHUY, 2008; POST; MURRAY, 2019) e por isso, carece de mais análise científica.

O distribuidor *pneumático* é caracterizado por conter um sistema de turbina ou ventilador que produz fluxo e pressão de ar suficiente para a condução do insumo do reservatório até as pontas de aplicação (HIGGINS, 2003; SRIVASTAVA et al., 2006). Este sistema é utilizado principalmente para aplicação localizada próximo as linhas de plantio por meio de barras horizontais (RYU et al., 2006) e a faixa de aplicação é determinada pela largura das barras de aplicação (THAPER, 2014).

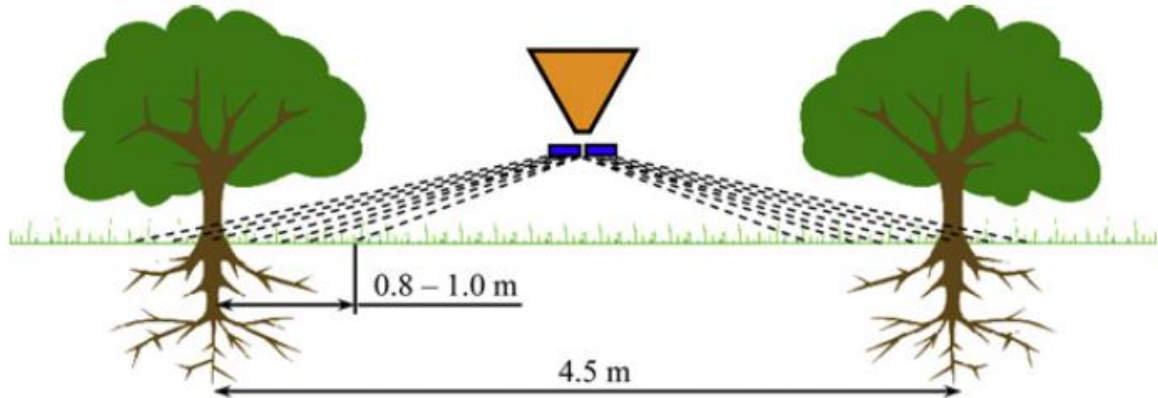
2.4.4. Posicionamento do fertilizante ou corretivo

Dentre as opções de posicionamento de fertilizantes e corretivos em relação ao solo e cultura, (FLORES, 2008; LUZ et al., 2010) consideram como principais tipos linha, faixa e área total ou a lanço. O posicionamento em linha é comumente utilizado no meio florestal para a chamada adubação de cobertura, onde filetes lineares de adubo granulado são depositados próximo a borda da copa de plantios jovens (MALHEIROS; QUEIROZ, 2013).

O posicionamento em faixa ocorre quando a aplicação é definida pela largura da máquina de modo que a superfície receba a mesma dose (RODRIGUES et al., 2016). Nesse sistema, não há sobreposição entre passadas adjacentes. Uma variação deste sistema é empregado em culturas com espaçamento elevado entre plantas, de forma que a aplicação é direcionada próximo a parte da copa com maior concentração das raízes (Figura 6) (COETZEE; LOMBARD, 2011). No cultivo do eucalipto, existem empresas florestais que utilizam este direcionamento enquanto outras não, sendo esta

variação basicamente determinada pelas características de insumo utilizado, propriedades do solo relacionados a adsorção de nutrientes e viabilidade técnica operacional do sistema de aplicação.

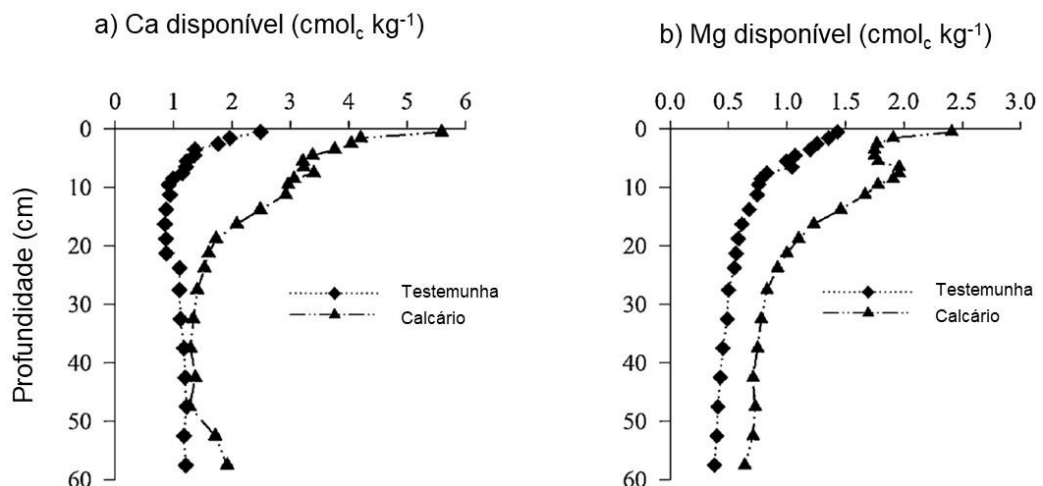
Figura 6 - Distribuição de fertilizantes em faixas em cultivos perenes



Fonte: Adaptado de Coetzee; Lombard (2011)

Para distribuição de calcário, o posicionamento mais comum é aplicação em área total ou a lanço. Apesar da aplicação a lanço realizar o contato do fertilizante apenas com a superfície do solo, diversos estudos demonstram que apesar da baixa solubilidade do calcário, este consegue atingir as profundidades agrônômicas de interesse (Figura 7) (CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006; VARGAS et al., 2019).

Figura 7 - Dispersão de Ca e Mg na camada de solo após aplicação de calcário



Fonte: Adaptado de Vargas et al. (2019)

De acordo com Reumers; Tijssens; Ramon (2003b), a aplicação a lanço difere das anteriores devido a característica de operação por meio de passadas paralelas sobrepostas das máquinas distribuidoras. A massa resultante obtida em sentido

perpendicular ao deslocamento do distribuidor em uma passada define o termo chamado de “distribuição transversal” (COOL et al., 2016b; REUMERS; TIJSKENS; RAMON, 2003b). A soma de diversas passadas, sobrepostas de acordo com a faixa de aplicação considerada, definem o padrão de distribuição do insumo (JONES; LAWRENCE; YULE, 2008).

2.5. Qualidade de aplicação

Para poder obter o padrão de aplicação de insumos sólidos agrícolas através de uma metodologia científica e que gere resultados comparáveis entre si, normas de entidades certificadas passaram a ser utilizadas em todo o mundo. As principais metodologias utilizadas para avaliação de uniformidade de distribuição de fertilizantes são o padrão ISO 5690/1 (ISO, 1985), a norma ASAE S341.5 (ASABE STANDARDS, 2018) dos Estados Unidos, o padrão ACCU na Austrália (AFSA, 2001), NZFQC *Spreadmark* na Nova Zelândia (NZFQC, 2006) e a GB/T5262-2008 da China (NSAC, 2008). Todavia, até o momento, não existe no Brasil, norma nacional para avaliação da distribuição de fertilizantes (ROSA et al., 2019).

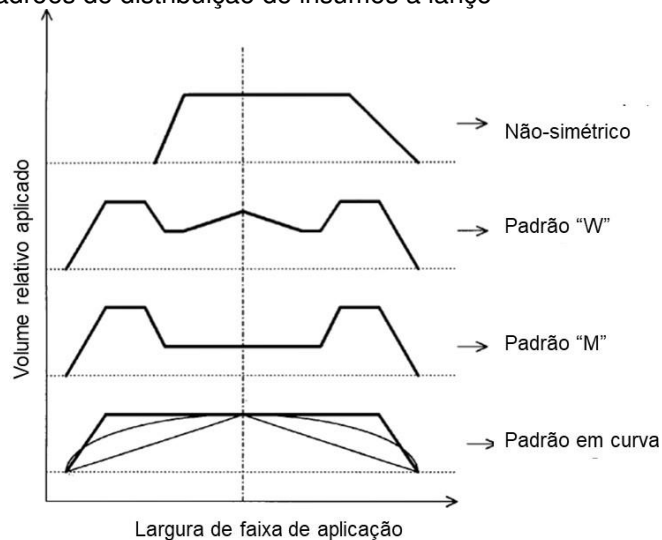
A principal métrica de avaliação de uniformidade de distribuição de um insumo refere-se ao *Coefficiente de Variação (CV)*. Quanto menor o valor do CV, mais uniforme é a distribuição do insumo (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017). De acordo Malinovic; Mesi; Kostic (2011) e Srivastava et al. (2006), o CV máximo aceitável não deve ultrapassar 15%. Para Hwang et al. (2019), o limite a ser considerado é de 20%. Porém, vários estudos demonstram que a variação medida em campo excede 40% (ROSA et al., 2019; WEIRICH NETO et al., 2013; YULE; GRAFTON, 2016).

Para aplicação de calcário seco, Weiss (1986) considera um CV muito bom até 10%, bom até 20%, regular até 33% e ruim acima de 33%. Essa elevada variabilidade pode ser atribuída à irregularidade do terreno, a vibração dos componentes do sistema de adubação do equipamento (ROSA et al., 2019), dentre outros fatores. Manter a uniformidade de distribuição de fertilizantes tem sua importância comprovada, como por exemplo, nos testes feitos por Sanaeifar; Sheikhdavoodi (2012) que obtiveram relação direta entre perda de produtividade de uma cultura agrícola e aumento do CV da fertilização realizada.

O CV também pode ser utilizado para a determinação da “largura efetiva de trabalho”. De acordo com Hachuy (2008), a largura de trabalho efetiva é aquela que, sendo a maior possível, apresenta um valor de CV dentro de determinado limite desejável, sendo um importante componente na composição final do perfil de distribuição de insumo.

Segundo Follet; Murphy; Donahue (1981), o padrão de distribuição transversal pode ser classificado em 6 tipos: plano, oval, piramidal, “M”, “W” e indeterminado. Já Grift et al. (2006) considera apenas três tipos: gaussiano, triangular e trapezoidal (teóricos). Olieslagers; Ramon; De-Baerdemaeker (1996) descrevem os tipos não-simétrico, “W”, “M” e em curva como sendo os tipos principais (Figura 8). Srivastava et al. (2006) resumem os principais tipos apenas em pirâmide, topo-plano e oval.

Figura 8 - Diferentes padrões de distribuição de insumos a lanço



Fonte: Adaptado de Olieslagers; Ramon; De-Baerdemaeker (1996).

Uma problemática referente a muitos dos trabalhos de avaliação de distribuição de insumos é que estes são feitos de forma estática ou em condições extremamente controladas (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017) e mesmo assim, indicam que a aplicação não segue um padrão permanentemente homogêneo. Aplicações de calcário em condições de campo produzem grande variabilidade de resultados conforme resumo da Tabela 3. O atingimento de elevados padrões de homogeneidade de distribuição de fertilizantes, calculados de acordo com as características do solo e exigências da cultura é indispensável para a viabilidade de um empreendimento.

Tabela 3 – Referências de distribuição de calcário mecanizada

Fonte de potência	Mecanismo distribuidor	Inclinação	Dose (kg.ha ⁻¹)	Largura de aplicação (m)	Vento (km.h ⁻¹)	CV (%)	Referência
Auto-propelido	Centrífugo	<2%	2000	14	11,5	30,3	A
Caminhão	Centrífugo	-	2000	12,25	8,0	20,0	B
		-	500-5000	6-15	-	25,0	C
Helicóptero	Centrífugo	-	2500	-	-	99-100	D
Trator agrícola	Centrífugo	-	-	10	-	9,8-32,0	F
		<2%	2000	-	6,8	13,5	A
		<2%	2000	-	10,0	13,9	A
		5%	2000	3,8-4,3	-	15,0	E
		<2%	2000	8	11,9	17,3	A
		-	-	12	-	18,2-48,8	F
		-	-	7,5	<7,2	20,3-47,8	G
		-	2000	-	0,2-3,5	21,6-26,6	H
		<2%	2000	11	10,8	27,8	A
		-	-	14	-	33,9-65,0	F
	5%	2000	-	-	74-110	E	
	Gravitacional	-	-	500	-	3,2	69,0
-		-	500	-	6,8	71,0	I
-		-	500	-	4,7	95,0	I

Em que: A = Cunha; Soares (2016); B = Luz et al. (2010); C = Post; Murray (2019); D = Bosela; Šeben (2010); E = Hachuy (2008); F = Farret et al. (2008); G = Sagrilo et al. (2019); H = Almeida (2018); I = Silveira et al. (2017).

A fertilização excessiva pode ser prejudicial as plantas, além de representar um desperdício de dinheiro, aumento da acidificação dos solos (BARAK et al., 1997; CAIRES et al., 2015; GAZEY; DAVIES, 2009), salinização de solos (KIM; WOO; KIM, 2018), maior risco de eutrofização de recursos hídricos (BECHMANN et al., 2005) e comprometimento das reservas naturais de fertilizantes (TILMAN et al., 2002).

Em contraponto, a fertilização insuficiente impacta diretamente no crescimento das plantas e produtividade da cultura (BARAC' et al., 2014; PRIMO et al., 2008). Utilizando curvas de calibração e resposta da cultura do trigo à adubação nitrogenada, Yule; Grafton (2016) estimaram uma perda de produtividade da cultura em até 113% quando o CV da aplicação era de 45% na dose de 200 kg/ha. Essa perda foi de apenas 7,87% quando o CV estava em 15%. Especificamente para a aplicação de calcário, doses abaixo do devido causam danos as plantas, enquanto doses excessivas podem bloquear a disponibilidade de micronutrientes e provocar indiretamente, deficiências de magnésio e potássio (GRUNWALDT et al., 2016). No setor florestal, doses excessivas de calcário (5-10 Mg.ha⁻¹) podem resultar em redução drástica do pH do solo e com isso afetar a microbiologia, disponibilidade de nutrientes como nitrogênio e boro, com conseqüente redução de produtividade de plantios florestais (SIKSTRÖM, 1997).

Outro parâmetro de qualidade importante refere-se a simetria de aplicação. De acordo com Laghari et al. (2014); Luz et al. (2010), este conceito pode ser entendido como o posicionamento do produto em relação ao eixo de aplicação tendo como base as doses médias das laterais esquerda e direitas e está diretamente ligado a homogeneidade da aplicação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo foi executado em áreas de uma empresa florestal do leste de Minas Gerais, na bacia hidrográfica do Rio Doce, que apresenta plantios de eucalipto híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* distribuídos em terrenos com inclinação variando de 0 a 45°, conforme distribuição apresentada na Tabela 4. A área de estudo está situada em um domínio ambiental conhecido como a região do Mar de Morros, com altitude variando de 600 a 700 m. Os solos predominantes na área de estudo são os Cambissolos e Latossolos. O clima predominante é o Aw (tropical com inverno seco) pela classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013).

Tabela 4 - Proporção de área plantada por faixa de inclinação

Unidades	0-10°	10-20°	20-30°	30-40°	>40°
Unidade A	23,8%	47,8%	19,5%	8,3%	0,5%
Unidade B	14,2%	35,8%	28,2%	19,8%	2,0%
Unidade C	36,4%	30,2%	21,7%	10,8%	0,9%
Média	24,5%	37,4%	23,5%	13,4%	1,2%

Fonte: o Autor

Dentre as variáveis climáticas características do local, a mais impactante para o estudo refere-se à velocidade de vento (Tabela 5). Os dados apresentados representam a média da velocidade máxima do vento para cada horário e período do ano, considerando a série histórica dos anos 2000 a 2022.

Tabela 5 - Histórico de média de velocidade máxima de vento (km.h⁻¹) nas áreas da empresa do experimento

Horário	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez	Média
00:00:00	5,97	5,65	5,29	5,00	4,67	4,69	5,22	5,87	6,50	6,45	6,30	5,92	5,62
01:00:00	5,92	5,58	5,32	5,06	4,72	4,68	5,23	5,83	6,44	6,38	6,19	5,83	5,60
02:00:00	5,87	5,51	5,31	5,06	4,71	4,65	5,17	5,76	6,31	6,27	6,05	5,73	5,53
03:00:00	5,75	5,43	5,18	4,96	4,70	4,59	5,05	5,65	6,12	6,10	5,84	5,57	5,41
04:00:00	5,61	5,27	5,06	4,86	4,66	4,53	4,93	5,51	5,94	5,91	5,61	5,37	5,27
05:00:00	5,42	5,15	4,92	4,75	4,61	4,49	4,90	5,38	5,79	5,74	5,42	5,21	5,15
06:00:00	5,22	4,98	4,78	4,66	4,56	4,47	4,83	5,25	5,62	5,55	5,26	5,06	5,02
07:00:00	5,07	4,75	4,57	4,50	4,52	4,44	4,79	5,09	5,40	5,42	5,18	4,91	4,88
08:00:00	5,19	4,78	4,49	4,38	4,39	4,32	4,63	4,94	5,47	5,53	5,29	5,04	4,87
09:00:00	5,45	5,05	4,70	4,57	4,43	4,28	4,67	5,11	5,74	5,68	5,38	5,25	5,02
10:00:00	5,57	5,29	4,87	4,76	4,66	4,51	4,95	5,41	5,89	5,80	5,46	5,40	5,21
11:00:00	5,69	5,43	4,97	4,77	4,82	4,73	5,22	5,53	6,02	5,94	5,60	5,53	5,35
12:00:00	5,83	5,58	5,08	4,81	4,78	4,82	5,35	5,62	6,16	6,04	5,74	5,69	5,46
13:00:00	5,99	5,66	5,16	4,80	4,74	4,82	5,40	5,70	6,24	6,13	5,81	5,80	5,52
14:00:00	6,09	5,76	5,14	4,78	4,65	4,77	5,37	5,72	6,25	6,14	5,91	5,92	5,54
15:00:00	6,13	5,76	5,11	4,70	4,51	4,61	5,22	5,62	6,13	6,16	5,90	5,92	5,48
16:00:00	6,08	5,66	5,02	4,56	4,29	4,36	4,98	5,43	5,99	6,15	5,81	5,93	5,36
17:00:00	5,99	5,56	4,87	4,34	4,09	4,10	4,65	5,20	5,85	6,09	5,75	5,87	5,20
18:00:00	5,74	5,44	4,78	4,36	4,15	4,14	4,56	5,05	5,75	5,98	5,78	5,71	5,12
19:00:00	5,52	5,39	4,95	4,58	4,37	4,37	4,76	5,26	5,92	6,07	5,87	5,68	5,23
20:00:00	5,57	5,43	5,11	4,76	4,50	4,47	4,95	5,49	6,17	6,29	6,12	5,85	5,39
21:00:00	5,69	5,55	5,21	4,83	4,48	4,55	5,01	5,63	6,35	6,46	6,24	5,89	5,49
22:00:00	5,78	5,55	5,22	4,87	4,53	4,65	5,07	5,69	6,39	6,56	6,31	5,93	5,54
23:00:00	5,87	5,59	5,24	4,92	4,60	4,70	5,15	5,80	6,45	6,53	6,38	5,90	5,59
Média	5,71	5,41	5,02	4,74	4,55	4,53	5,00	5,48	6,04	6,06	5,80	5,62	5,33

Escala			
Valor (km.h ⁻¹)	4,1	5,3	6,6

Fonte: CENIBRA (2023)

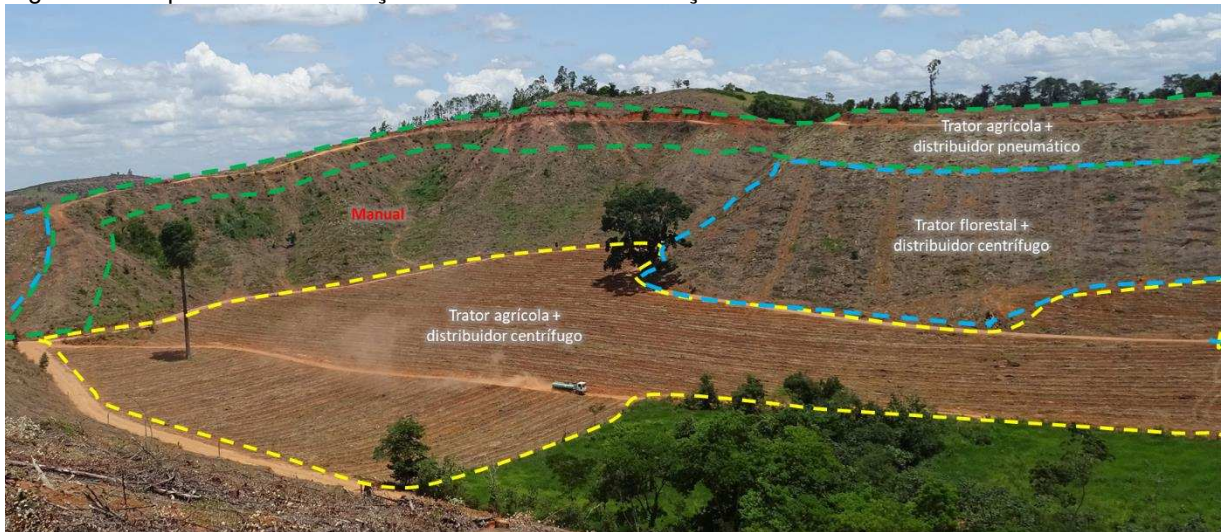
O experimento foi realizado em áreas em que já houve a derrubada de árvores, retirada da madeira do talhão e estavam aguardando novos plantios. O sistema de colheita utilizado foi o *cut-to-length*, com conservação das folhas, cascas e galhos não aproveitados durante o processo de colheita florestal, presentes nos locais onde houve o tráfego dos equipamentos.

3.2. Máquinas utilizadas

Na área da empresa, há diferentes formas de realizar a adubação de calcário, sendo que o relevo é o fator predominante para definição do método, associado com

variáveis de custo. Todas as áreas mecanizáveis são realizadas de acordo a capacidade de cada sistema mecanizado e o restante permanece sendo aplicado de forma manual (Figura 9). Para este trabalho, os sistemas mecanizados selecionados foram aqueles com operação consolidada nos terrenos montanhosos da empresa e disponíveis para a realização do estudo, sendo denominados de M1 (Trator agrícola com distribuidor centrífugo), M2 (Trator florestal com distribuidor centrífugo) e M3 (Trator agrícola com distribuidor pneumático).

Figura 9 - Esquema de distribuição de sistemas de adubação de calcário



Fonte: o Autor.

Os equipamentos utilizados apresentam diferentes idades, porém todos se encontravam em condições similares quanto a manutenção e conservação de componentes, principalmente no que se refere aos mecanismos dosadores e distribuidores. Falhas e problemas que pudessem comprometer a execução dos testes e comparação entre equipamentos foram previamente resolvidos.

3.2.1. M1 – Trator agrícola + Distribuidor centrífugo

O trator agrícola selecionado para avaliação é da marca Massey Ferguson, modelo 4292 HD, fabricado em 2015, apresentando tração 4x2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), com potência nominal no motor de 85,3 kW a 2.200 rpm (SAE J1995). Na operação de aplicação de calcário, este trator foi validado em trabalhos anteriores internos da empresa, para operação em terrenos com inclinação longitudinal máxima

de 20° e inclinação lateral máxima de 17°. Por questões de segurança, a velocidade máxima de operação permitida para as áreas onde os testes foram executados é de 5,0 km.h⁻¹, sendo que, a velocidade média praticada foi de 3,1 km.h⁻¹ com rotação do motor adequada para trabalhar com rotação na tomada de potência de 540 rpm. O trator utilizou pneus dianteiros agroflorestais 14.9-24 R1 e pneus traseiros agroflorestais 18.4-34 R1, com lastro de água traseiro a 75% do volume dos pneus.

O equipamento acoplado utilizado foi um distribuidor de calcário de arrasto da marca Tatu-Marchesan, modelo DCA MC 2500, fabricado em 2016. O equipamento apresenta volume de carga de 1,4 m³, vazão máxima de 7.200 kg.ha⁻¹, faixa de aplicação de até 14 m, rodado fixo, eixo único, massa líquida de 794 kg, com acionamento por meio da tomada de potência do trator à rotação de 540 rpm. O equipamento possui uma esteira única alocada dentro da caçamba, que atua como dosador volumétrico ao transportar o insumo para uma saída na qual dois discos giratórios utilizam de força centrífuga para realizar a aplicação do insumo nas áreas de interesse (Figura 10). Os discos apresentavam 500 mm de diâmetro, com 4 aletas uniformemente distribuídas posicionadas em ângulos de 90° em relação ao centro do disco e não foram objetos de estudo. A aplicação foi feita a lanço considerando uma faixa útil de 9,0 m para a aplicação de calcário.

Figura 10 - Distribuidor de calcário de arraste com discos centrífugos realizando aplicação em área florestal



Fonte: o Autor.

3.2.2. M2 – Trator florestal + Distribuidor centrífugo

O trator florestal *forwarder* utilizado é da marca John Deere, modelo 1910E, fabricado em 2012, apresenta tração 8x8 e potência nominal no motor de 186 kW a 1.900 rpm. Este tipo de equipamento é projetado para operações de transporte de madeira dentro de áreas florestais e devido a sua capacidade de alcançar elevadas inclinações (até 27°), tem sido utilizado a mais de 10 anos na empresa para aplicação de calcário (Figura 11). Para esta operação, houve a retirada da caixa de carga e substituição por um distribuidor de calcário convencional de grande volume.

Figura 11 - Trator florestal realizando aplicação de calcário



Fonte: o Autor.

Este trator foi validado em trabalhos anteriores internos da empresa, para operação em terrenos com inclinação longitudinal máxima de 27° e inclinação lateral máxima de 8°. Por questões de segurança, a velocidade máxima de operação permitida para as áreas onde os testes foram realizados é de 3,5 km.h⁻¹, sendo que a velocidade média foi de 2,5 km.h⁻¹. O trator utilizou pneus florestais 750/55-26.5 R1 com lastro de água a 75% do volume dos pneus, além de sistema de esteira metálica de tração conectando os pares de pneus.

O distribuidor de calcário da marca Piccin, modelo 10000 DH, fabricado em 2017 e montado sobre o trator florestal tem volume de carga de 7,0 m³, capacidade de carga de 12.000 kg, dose máxima de 16.300 L.ha⁻¹, faixa de aplicação de até 25 m e massa líquida de 2.320 kg. O equipamento opera com acionamento hidráulico através de bomba hidráulica dedicada. Da mesma forma que o distribuidor de calcário

anterior, este equipamento também contém uma esteira única dentro da caçamba, que atua como dosador volumétrico ao transportar o insumo para uma saída na qual dois discos giratórios utilizam de força centrífuga para realizar a aplicação do insumo.

A aplicação foi feita a lanço considerando a faixa útil de 15,0 m para a aplicação de calcário, conforme prática operacional corrente. Os discos apresentavam 700 mm de diâmetro, com 4 aletas uniformemente distribuídas posicionadas em ângulos de 90° em relação ao centro do disco e não foram objetos de estudo.

3.2.3. M3 – Trator agrícola + Distribuidor pneumático

O trator agrícola selecionado para avaliação é da marca Massey Ferguson, modelo 4292 HD, fabricado em 2015, apresenta tração 4x2 TDA, com potência nominal no motor de 85,3 kW a 2.200 rpm (SAE J1995). Devido a questões de estabilidade do conjunto e fragilidade de componentes do equipamento em caso de possível tombamento, esta aplicação é feita exclusivamente a partir de bordas de estrada com a aplicação sendo direcionada para o interior do talhão (Figura 12). A velocidade máxima de operação permitida para as áreas onde os testes foram executados é de 5,0 km.h⁻¹, sendo que, a velocidade média praticada foi de 3,6 km.h⁻¹ com rotação do motor adequada para trabalhar com rotação na tomada de potência de 540 rpm. O trator utilizou pneus dianteiros agroflorestais 14.9-24 R1 e pneus traseiros agroflorestais 18.4-34 R1, com lastro de água traseiro a 75% do volume dos pneus.

Figura 12 – Exemplo de distribuidor de calcário pneumático com deslocamento em estrada e aplicação dentro do talhão



Fonte: o Autor.

O distribuidor de calcário pneumático utilizado é da marca AgMetal, modelo Ag2000XF, fabricado em 2020. O equipamento é de arrasto, com capacidade de carga de 2.000 kg, faixa de aplicação de até 30 m e massa líquida de 950 kg. Apresenta acionamento hidráulico através de bomba hidráulica acoplada na tomada de potência do trator de 540 rpm de rotação. Dentro da caçamba, há uma esteira única que transporta o insumo para uma saída na qual um sistema de turbina geradora de pressão de ar, realiza a aplicação do insumo nas áreas de interesse. A aplicação ocorre apenas de forma unilateral, ou seja, somente em um lado do equipamento, sem ocorrência de sobreposição de passadas.

Ao contrário dos distribuidores pneumáticos convencionais em que a pressão de ar que conduz o fertilizante por tubulações até uma aplicação localizada, o equipamento em teste utiliza o grande volume e pressão de ar produzidos, aplicados em tubo condutor de maior diâmetro e menor comprimento, para lançar as partículas do insumo ao longo da área, obtendo, normalmente, grandes capacidades de vazão e projeção a depender do tipo de insumo utilizado.

Devido ao longo alcance da aplicação pneumática de insumos, o equipamento foi utilizado por meio de deslocamento em estradas para aplicação em áreas de difícil acesso ou que não era possível o tráfego de máquinas convencionais. Dessa forma, a aplicação pôde ser realizada sobre áreas com qualquer grau de inclinação, já que o trator de arraste permanece em condições seguras na estrada/acesso. A aplicação foi feita a lanço considerando a faixa útil de 18,0 m para a aplicação de calcário.

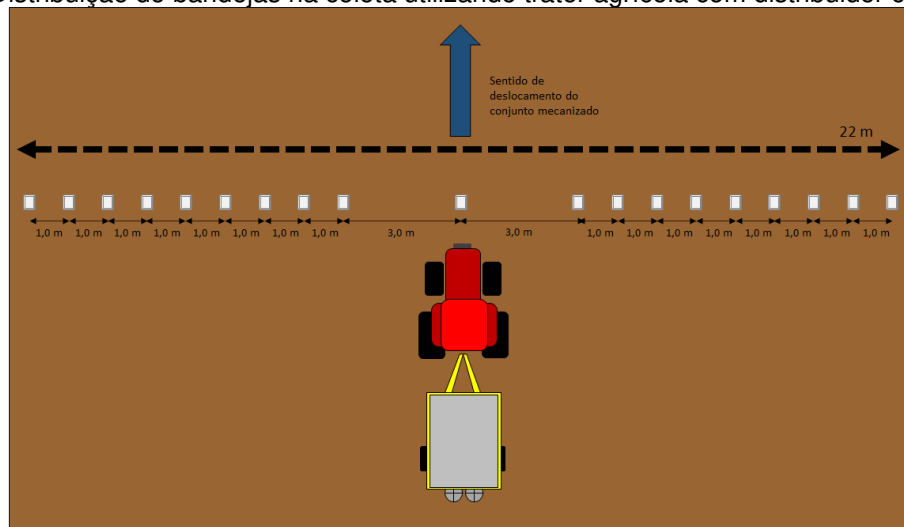
3.3. Avaliação da qualidade de aplicação

Devido as características dos distribuidores utilizados, o controle da dose foi feito através da abertura do comporta de alimentação dos discos/turbina. A dose aplicada representa o valor mediano praticado para a cultura nas áreas da empresa onde foi executado o teste e, por isso, fixada em $1.500 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Antes do início das coletas de campo foi feita a calibração dos equipamentos com a dose supracitada. O insumo aplicado foi o calcário dolomítico comercial de natureza física em pó MAPA (2018), com teores de óxido de cálcio (CaO) em 30%, óxido de magnésio (MgO) em 12% e teor de umidade médio de 12,5%, sendo que os resultados foram obtidos em análises laboratoriais de amostras coletadas durante os trabalhos de campo.

Para a avaliação da uniformidade e do padrão da aplicação foram utilizadas as recomendações contidas na norma ASAE S341.5 (ASABE STANDARDS, 2018), que trata dos procedimentos para medição de uniformidade de distribuição e calibração de distribuidores de fertilizantes. Conforme estabelecido na norma ASAE S341.5, os limites de velocidade de vento ambiente para aplicação foram restritos a velocidade máxima de $2,0 \text{ m.s}^{-1}$. Para tanto, foi utilizado um anemômetro digital para medições e acompanhamento durante a realização dos trabalhos. Amostras coletadas com velocidade de vento superior ao limite foram descartadas.

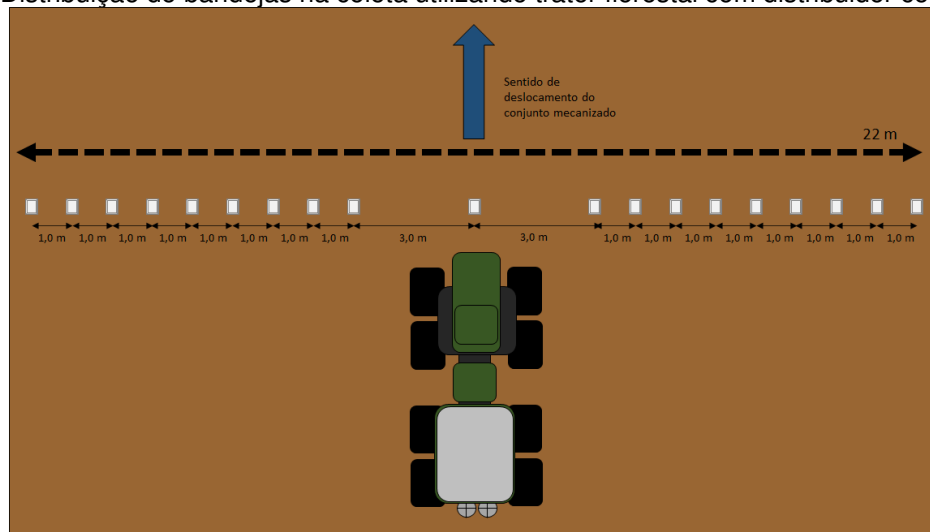
Para a realização das amostragens foi disposta uma fileira de bandejas igualmente espaçadas entre si e dispostas perpendicularmente ao sentido de deslocamento do veículo (Figuras 13, 14 e 15) (ASABE STANDARDS, 2018; KHUDHER; HIMOUD; ALMALIKI, 2020). As bandejas plásticas tinham como dimensões internas, 0,50 m de comprimento, 0,38 m de largura e 0,10 m de profundidade, sendo que estavam em conformidade com as recomendações da norma ASAE S341.5. A quantidade utilizada foi a suficiente para cobrir uma faixa de aplicação de até 22 m. A distância entre bandejas coletoras foi de 1 metro, com exceção para as bandejas posicionadas sobre a linha de deslocamento dos tratores que foram retiradas para permitir a passagem das máquinas (SANAEIFAR; SHEIKHDAVOODI, 2012). Durante a análise, o valor para as bandejas centrais ausentes foi determinado por extrapolação das bandejas vizinhas.

Figura 13 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator agrícola com distribuidor centrífugo



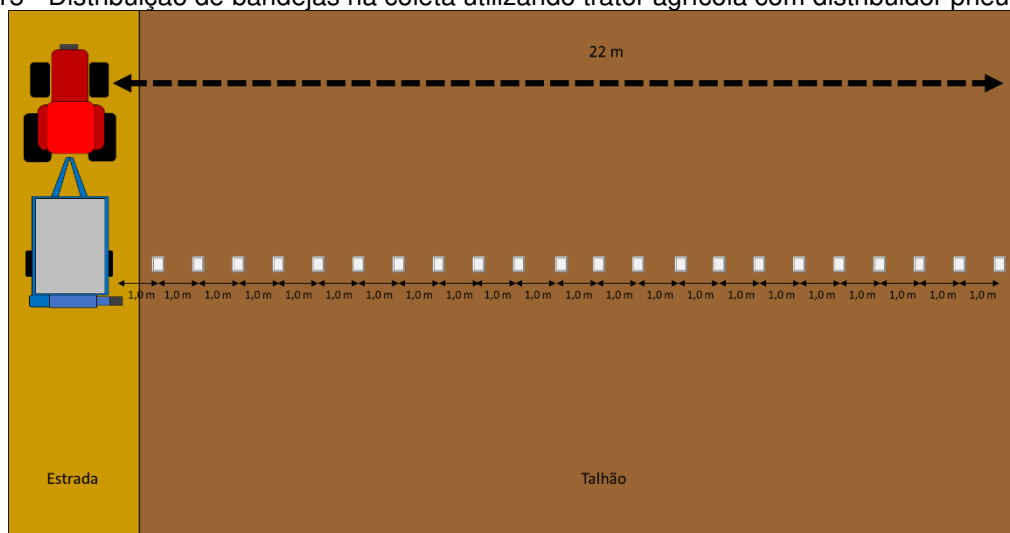
Fonte: o Autor

Figura 14 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator florestal com distribuidor centrífugo



Fonte: o Autor

Figura 15 - Distribuição de bandejas na coleta utilizando trator agrícola com distribuidor pneumático



Fonte: o Autor

Como se trata de insumo em pó, não foi necessário a instalação de defletores internos na bandeja para atenuar impactos das partículas sobre as paredes do recipiente (BAIO; MOLIN; LEAL, 2012; MOLIN; MAZZOTTI, 2000). Por se tratar de experimento realizado em terrenos inclinados, a bandeja foi mantida nivelada de forma que as paredes laterais da mesma não prejudicassem a deposição do material aplicado. A aplicação iniciou 10 m antes e terminou 10 m depois da passagem pela linha de coletores conforme utilizado por Cunha; Soares (2016).

Devido à baixa velocidade de deslocamento dos conjuntos mecanizados, essa distância permitiu que a aplicação fosse normalizada antes de atingir a linha de coleta. Após a aplicação, o produto depositado nas bandejas foi coletado e armazenado em

plásticos individuais identificados, com posterior pesagem em balança de precisão com resolução de 0,01 g (CUNHA; SOARES, 2016; JONES; LAWRENCE; YULE, 2008).

Além de utilizar a faixa útil de aplicação operacional praticada para cada tipo de equipamento, utilizou-se a sobreposição lateral esquerda ou direita conforme prática operacional local para a atividade (CUNHA; SOARES, 2016). A metodologia foi M1 – Trator agrícola + Distribuidor centrífugo em sistema alternado a direita, M2 – Trator florestal + Distribuidor centrífugo em sistema contínuo e M3 – Trator agrícola + Distribuidor pneumático sem sobreposição. Para avaliação da uniformidade de aplicação foi calculado o coeficiente de variação (CV) a partir dos valores médios e de desvio padrão obtidos nas pesagens das coletas (SAGRILLO et al., 2019). Outro parâmetro de qualidade avaliado foi a simetria de aplicação. A simetria é determinada dividindo-se a dosagem média do lado direito pela dosagem média do lado esquerdo (LUZ et al., 2010b). A partir da dose média ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e a dose esperada de $1.500 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ foi calculado a variável “Atingimento de dose”.

Todos os dados coletados em campo foram processados e analisados em planilha eletrônica *Microsoft Excel*, para geração de tabelas e gráficos (SANAEIFAR; SHEIKHDAVOODI, 2012). Além disso, o programa *Adulção 3.1* (SPEKKEN et al., 2015) foi utilizado para determinação dos padrões de distribuição entre tratamentos, bem como para determinação do CV em cada faixa a partir de simulação de recobrimentos sucessivos com os valores acumulados obtidos nas bandejas coletoras (MOLIN, 2002). O programa também foi utilizado para determinar a largura efetiva de trabalho com base em limites simulados. A largura de trabalho efetiva é aquela que, sendo a maior possível, apresenta um valor de CV dentro do limite desejável (HACHUY, 2008).

Há diversos limites para a variável CV disponíveis na literatura (GRAFTON; YULE; MANNING, 2013; MALINOVIĆ; MEŠI; KOSTIĆ, 2011; ORTIZ-CANAVATE, 1994; WEISS, 1986) que são utilizados para se definir se a aplicação naquelas condições é tecnicamente recomendada ou não. Entretanto, não se adotou nenhum limite recomendado específico devido à alta variabilidade esperada para a aplicação em condições reais de campo (PARISH, 1991), e por isso, as análises de largura efetiva de trabalho foram feitas para os diferentes limites aceitáveis simulados.

3.4. Avaliação do efeito da inclinação

As áreas para implantação das parcelas foram previamente definidas a partir de faixas de inclinação determinadas por mapeamento com imagens LiDAR e averiguados em campo utilizando clinômetro digital portátil com resolução de 0,1° e acurácia de $\pm 0,2^\circ$. A seleção das faixas de inclinação foi realizada em função da capacidade de avanço em rampa de cada sistema mecanizado, sem redução da segurança na execução das operações (Tabela 6). As faixas selecionadas foram denominadas I1 (inclinação entre 0 e 10°), I2 (inclinação entre 10,1 e 20,0°), I3 (inclinação entre 20,1 e 30,0°) e I4 (inclinação entre 30,1 e 40,0°).

Tabela 6 - Posicionamento dos sistemas mecanizados para realização das aplicações em função da inclinação da área aplicada

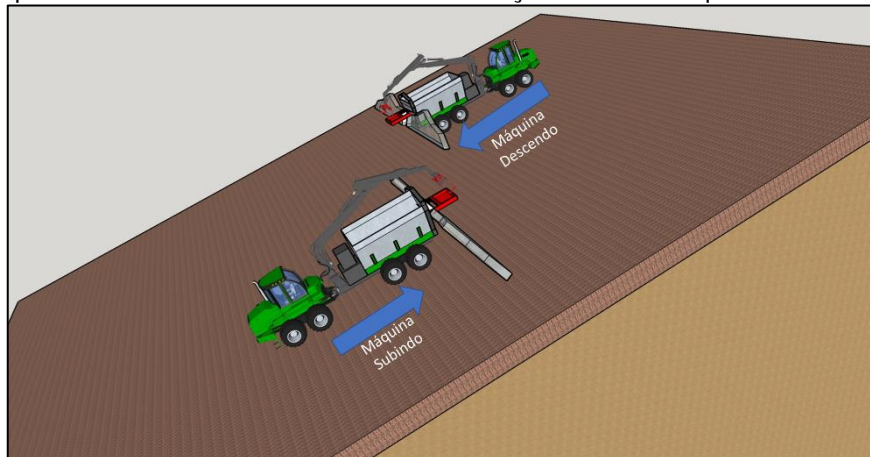
Sistemas mecanizados	Faixas de inclinação do terreno			
	I1 - 0-10°	I2 - 10-20°	I3 - 20-30°	I4 - 30-40°
M1 - Trator agrícola + distribuidor centrífugo	Campo	Campo	--	--
M2 - Trator florestal + distribuidor centrífugo	Campo	Campo	Campo	--
M3 - Trator agrícola + distribuidor pneumático	Estrada	Estrada	Estrada	Estrada

Em que: Campo = a máquina e equipamento deslocaram dentro dos talhões com aplicação também dentro dos talhões. Estrada = a máquina e equipamento deslocaram nas estradas com aplicação direcionada para dentro dos talhões

3.5. Avaliação do efeito do sentido de posicionamento do distribuidor

Para avaliar o impacto que o posicionamento longitudinal do conjunto mecanizado tem sobre a movimentação de insumos dentro da caçamba do equipamento e sobre os mecanismos de distribuição, cada conjunto de máquinas foi avaliado no sentido ascendente e descendente perpendicular à inclinação do terreno (Figura 16), ou seja, foi operado nos sentidos longitudinais denominados S1 (equipamento/aplicação descendo o terreno) e S2 (equipamento/aplicação subindo o terreno). Foram utilizadas superfícies planas inclinadas sem presença de obstáculos ou mudanças abruptas de relevo que pudessem comprometer a projeção do insumo no solo (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017).

Figura 16 - Esquema ilustrativo de sentido de movimentação de uma máquina no terreno



Fonte: o Autor

3.6. Delineamento experimental

O experimento foi realizado em esquema de parcelas sub-subdivididas com 6 repetições para cada tratamento em um design incompleto, conforme mostrado na Tabela 7. Em resumo, foram realizados um total de 18 tratamentos e 108 unidades experimentais.

Para a avaliação do atendimento das pressuposições de distribuição normal foram utilizados para análise de normalidade dos resíduos, os testes de *Shapiro-Wilk* e *Liliefors*. Para a verificação de homoscedasticidade, utilizou-se os testes de *Bartlett*, *Fligner* e *Levene*. Variáveis que não atenderam os pressupostos foram normalizadas utilizando as transformações de raiz quadrada, arco-seno e box-cox. Para dados em que não foi possível a normalização, utilizou-se o teste não paramétrico de *Dunn*.

Para os dados normalizados, a partir dos resultados obtidos pela combinação de tratamentos foi realizado uma análise de variância dos dados. Para as interações significativas a níveis de probabilidade de 5%, prosseguiu-se com o teste de comparação de médias de *Tukey*.

Tabela 7 - Relação de tratamentos realizados durante os experimentos de campo

Tratamento	Máquinas	Inclinação	Sentido	Repetições
M1I1S1	M1 - Trator agrícola + Distribuidor centrífugo	I1 - 0-10°	S1 - Descendo	6
M1I1S2			S2 - Subindo	6
M1I2S1		I2 - 10-20°	S1 - Descendo	6
M1I2S2			S2 - Subindo	6
M1I3S1		I3 - 20-30°	S1 - Descendo	ND
M1I3S2			S2 - Subindo	ND
M1I4S1		I4 - 30-40°	S1 - Descendo	ND
M1I4S2			S2 - Subindo	ND
M2I1S1	M2 - Trator florestal + Distribuidor centrífugo	I1 - 0-10°	S1 - Descendo	6
M2I1S2			S2 - Subindo	6
M2I2S1		I2 - 10-20°	S1 - Descendo	6
M2I2S2			S2 - Subindo	6
M2I3S1		I3 - 20-30°	S1 - Descendo	6
M2I3S2			S2 - Subindo	6
M2I4S1		I4 - 30-40°	S1 - Descendo	ND
M2I4S2			S2 - Subindo	ND
M3I1S1	M3 - Trator agrícola + Distribuidor pneumático	I1 - 0-10°	S1 - Descendo	6
M3I1S2			S2 - Subindo	6
M3I2S1		I2 - 10-20°	S1 - Descendo	6
M3I2S2			S2 - Subindo	6
M3I3S1		I3 - 20-30°	S1 - Descendo	6
M3I3S2			S2 - Subindo	6
M3I4S1		I4 - 30-40°	S1 - Descendo	6
M3I4S2			S2 - Subindo	6

Em que: tratamentos com repetições com símbolo “ND” não foram executados devido às limitações técnicas dos equipamentos.

Toda a análise estatística foi feita no programa *R v. 4.2.2* (R CORE TEAM, 2022) utilizando a interface *RStudio* (POSIT TEAM, 2022) e pacotes *agricolae* (MENDIBURU, 2021), *AgroR* (SHIMIZU; MARUBAYASHI; GONCALVES, 2022), *car* (FOX; WEISBERG, 2019), *ExpDes.pt* (FERREIRA; CAVALCANTI; NOGUEIRA, 2021), *ggpubr* (KASSAMBARA, 2023a), *lmtest* (ZEILEIS; HOTHORN, 2002), *MASS* (VENABLES; RIPLEY, 2002), *nortest* (GROSS; LIGGES, 2015), *pacman* (RINKER; KURKIEWICZ, 2018), *psych* (REVELLE, 2022), *readxl* (WICKHAM; BRYAN, 2023) e *rstatix* (KASSAMBARA, 2023b). Por se tratar de um design completo, houve necessidade de cuidado especial nas análises de variâncias e na garantia de ajuste de graus de liberdade, sendo necessário a integração de vários pacotes para conclusão da análise.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização dos ensaios de campo

Durante as coletas de campo, a variável ambiental mais impactante foi o vento, sendo que a média da velocidade máxima do vento foi de $4,58 \text{ km.h}^{-1}$. Para atender a premissa de limite de velocidade de vento, o horário de coletas tornou-se restrito e ainda assim, houve a necessidade de descartar coletas em que a velocidade de vento foi superior ao limite recomendado. Mesmo dentro das coletas com velocidade de vento inferior ao limite, foi nítido o impacto visual sobre a faixa de aplicação (Figura 17). Esse fator tende a aumentar a variabilidade dos resultados conforme destacado por Cunha; Soares (2016); Magni (2013) e Silveira et al. (2017). Almeida (2018) menciona ainda que em ensaios de campo a céu aberto como este, não é possível controlar as variações climáticas e que o vento com velocidade de $3,5 \text{ km.h}^{-1}$ é altamente influente no perfil de distribuição de calcário extremamente seco.

Figura 17 - Efeito do vento sobre a distribuição de calcário



Fonte: o Autor

4.2. Distribuição ao longo da faixa

Em cada parcela amostrada foram realizadas coletas compreendendo uma faixa de 22 metros. Ao avaliar a faixa de aplicação, observou-se que nenhum tratamento apresentou distribuição normal quando analisados pelos testes de

normalidade *Shapiro-Wilk* e *Kolmogorov-Smirnov*. Esse resultado condiz com os resultados descritos por Follet; Murphy; Donahue (1981); Grift et al. (2006); Srivastava et al. (2006); Olieslagers; Ramon; De-Baerdemaeker (1996) e que mencionam sobre os diferentes padrões esperados para a distribuição de calcário, como distribuição em padrão “M”, plano, oval, piramidal, “W”, triangular, trapezoidal, em curva e indeterminado. Os padrões médios de todos os tratamentos obtidos para cada conjunto mecanizado estão ilustrados nos Gráficos 1, 2 e 3, e os resultados para cada tratamento estão no Apêndice A, elaborado utilizando o programa *Adulango 3.1*.

Gráfico 1 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M1

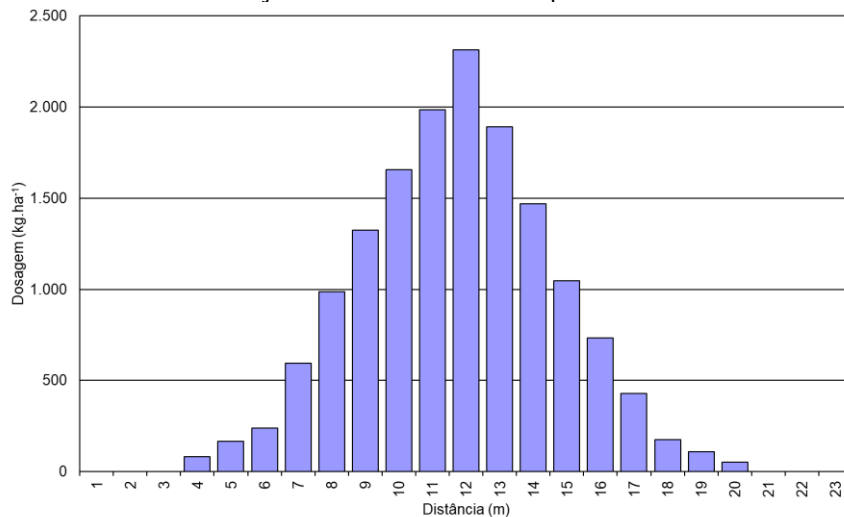


Gráfico 2 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M2

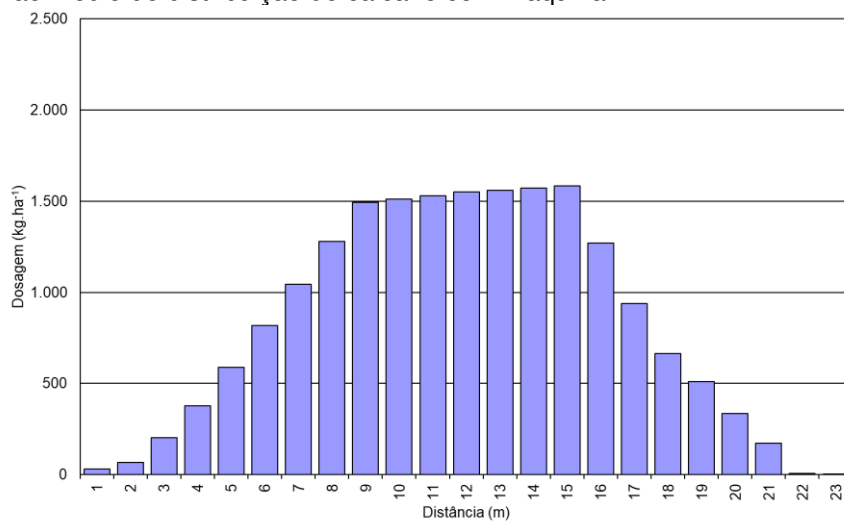
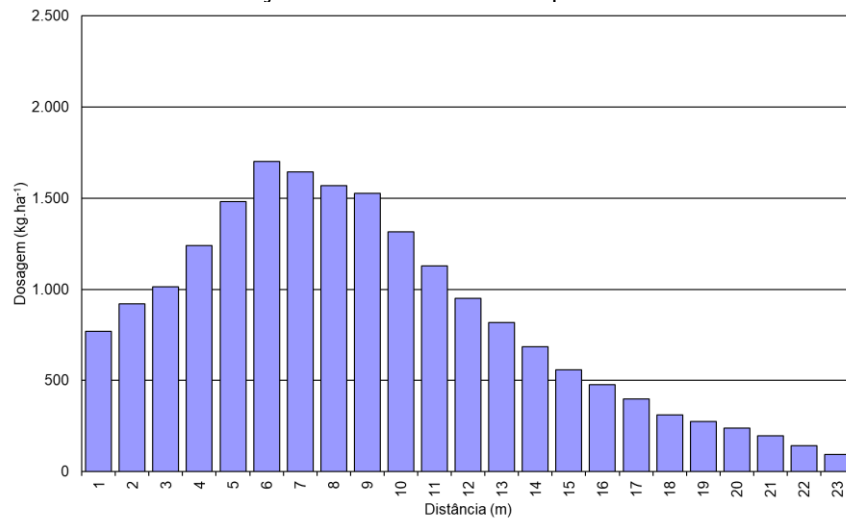


Gráfico 3 - Padrão médio de distribuição de calcário com Máquina M3



4.3. Avaliação de padrão de distribuição

Na Tabela 8 estão indicados os valores médios de Coeficiente de Variação (CV), simetria, dose aplicada (kg.ha^{-1}) e de atingimento da dose esperada. Para cada uma das variáveis de interesse pertinentes foi feito a análise de variância a 5% de significância e os resultados são apresentados na Tabela 9. Para a variável CV, os fatores F1 e F2 afetam isoladamente e em interação. Para as demais variáveis Dose média aplicada e Atingimento da dose esperada, os fatores F1 e F2 afetaram de forma isolada o resultado.

Tabela 8 - Resultados médios de cada experimento

Tratamento	Máquinas	Inclinação	Sentido	CV (%)	Dose (kg.ha ⁻¹)	Simetria	Atingimento de dose esperada (%)	
M1I1S1	M1	I1	S1	16%	1.795	0,92	120%	
M1I1S2			S2	19%	1.513	0,94	101%	
M1I2S1		I2	S1	39%	1.759	0,69	117%	
M1I2S2			S2	42%	1.479	0,92	99%	
M2I1S1	M2	I1	S1	38%	1.604	1,07	107%	
M2I1S2			S2	31%	1.585	1,01	106%	
M2I2S1		I2	S1	41%	1.461	0,96	97%	
M2I2S2			S2	48%	1.097	1,33	73%	
M2I3S1		I3	S1	51%	1.224	1,89	82%	
M2I3S2			S2	42%	1.074	1,39	72%	
M3I1S1		M3	I1	S1	65%	1.027	0,00	68%
M3I1S2				S2	62%	995	0,00	66%
M3I2S1	I2		S1	69%	1.016	0,00	68%	
M3I2S2			S2	67%	773	0,00	52%	
M3I3S1	I3		S1	86%	979	0,00	65%	
M3I3S2			S2	115%	603	0,00	40%	
M3I4S1	I4		S1	95%	833	0,00	56%	
M3I4S2			S2	129%	539	0,00	36%	
Média geral				59%	1.186	0,62	79%	

Em que: M1 – Trator +distribuidor centrífugo; M2 - Trator florestal + distribuidor centrífugo; M3 - Trator agrícola + distribuidor pneumático; I1 - Inclinação entre 0 e 10°; I2 - Inclinação entre 10,1 e 20,0°; I3 - Inclinação entre 20,1 e 30,0°; I4 - Inclinação entre 30,1 e 40,0°; S1 – Sentido subindo; S2 – Sentido descendo.

Tabela 9 - Análise de variância para dados normalizados de Coeficiente de Variação, Dose aplicada e Atingimento de dose.

	Variável		CV	Dose aplicada (kg.ha ⁻¹)	Atingimento de dose (%)
	GL	QM	QM	QM	QM
Repetição	5	0,03		0,00	1,71
F1	2	1,58***		0,14***	113,62***
Erro A	10	0,03		0,00	1,19
F2	3	0,25***		0,02***	12,42***
F1xF2	3	0,06*		0,00	1,57
Erro B	30	0,01		0,00	1,34
F3	1	0,02		0,04***	28,14***
F1xF3	2	0,02		0,00	0,67
F2xF3	3	0,02		0,00	1,60
F1xF2xF3	3	0,02		0,00	1,22
Erro C	45	0,01		0,00	1,35

Em que: GL = Grau de liberdade; SQ = Soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F1 = Fator 1 – Máquinas; F2 = Fator 2 – Inclinação; F3 = Fator 3 – Sentido; *** = Significativo a 0,1%; ** = Significativo a 1%; * = Significativo a 5%; . = Significativo a 10%

A análise estatística para a variável *Coeficiente de Variação* demonstrou distribuição normal pelo teste de normalidade dos resíduos pelos métodos de *Shapiro-Wilk* e *Liliefors*. Entretanto, a avaliação de homoscedasticidade resultou em variâncias

não homogêneas pelos testes de *Bartlett*, *Fligner* e *Levene*. Devido a isso, os dados foram corrigidos utilizando a transformação de raiz quadrada para atingimento da homogeneidade de variância esperada.

A análise para a variável *Simetria* não demonstrou distribuição normal pelo teste de normalidade dos resíduos pelos métodos de *Shapiro-Wilk* e *Liliefors*. Nenhum tratamento de normalização de dados (raiz quadrada, arco-seno, log, box-cox) foi suficiente para gerar a normalidade esperada e por isso, os resultados foram comparados por meio do teste não paramétrico de *Dunn*.

A análise estatística para a variável *Média de dose aplicada (kg.ha⁻¹)* não demonstrou distribuição normal pelo teste de normalidade dos resíduos pelos métodos de *Shapiro-Wilk* e *Liliefors*. Devido a isso, os dados foram corrigidos utilizando transformação de arco-seno para atingimento da normalidade esperada. A avaliação de homoscedasticidade dos dados normalizados resultou em variâncias homogêneas pelos testes de *Bartlett*, *Fligner* e *Levene*.

A análise para a variável *Atingimento de dose esperada* não demonstrou distribuição normal pelo teste de normalidade dos resíduos pelos métodos de *Shapiro-Wilk* e *Liliefors*. Devido a isso, os dados foram corrigidos utilizando transformação de box-cox para atingimento da normalidade esperada. A avaliação de homoscedasticidade dos dados normalizados resultou em variâncias homogêneas pelos testes de *Bartlett*, *Fligner* e *Levene*.

4.3.1. Máquinas para aplicação de calcário

Ao comparar os resultados experimentais com a literatura (Tabela 10), observa-se que o coeficiente de variação experimental foi pior que o recomendado na maioria das referências científicas. Esse resultado era esperado visto que, normalmente, os trabalhos científicos são feitos em laboratório, pistas ou em condições extremamente controladas e por isso, avaliações em condições de campo, tendem a apresentar maior variabilidade (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017). De forma geral, trabalhos feitos em diferentes condições operacionais e ambientais apresentam grande amplitude de resultados, principalmente quando utilizando-se calcário muito seco (ALMEIDA, 2018) e em presença de vento (CUNHA; SOARES, 2016; SILVEIRA et al., 2017).

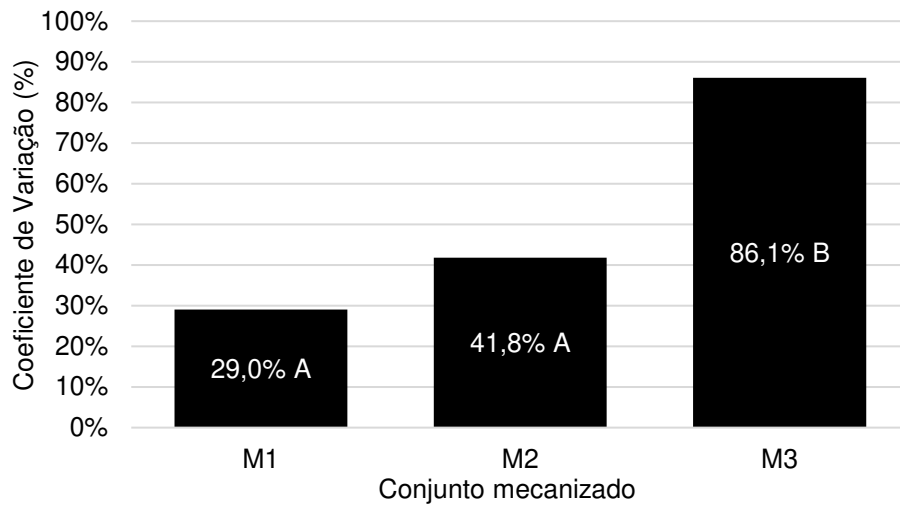
Tabela 10 - Resultados experimentais x Limites técnicos recomendados

Tratamento	CV Médio	CV limite recomendado por referência científica								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
		15%	15%	15%	20%	20%	20%	25%	30%	33%
M1I1S1	16,2%	-	-	-	R	R	R	R	R	R
M1I1S2	18,6%	-	-	-	R	R	R	R	R	R
M1I2S1	39,3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M1I2S2	42,1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2I1S1	37,9%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2I1S2	31,2%	-	-	-	-	-	-	-	-	R
M2I2S1	41,2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2I2S2	48,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2I3S1	51,1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M2I3S2	41,6%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I1S1	65,5%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I1S2	62,2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I2S1	69,4%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I2S2	67,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I3S1	86,0%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I3S2	114,7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I4S1	95,1%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M3I4S2	128,8%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Média	58,7%	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Em que; A = Malinovic; Mesi; Kostic (2011); B = Srivastava et al. (2006); C = Ortiz-Canavate (1994); D = Hwang et al. (2019); E = Crozier; Roberson (2014); F = Luz et al. (2010); G = Grafton; Yule; Manning (2013); H = Valdez (1978); I = Weiss (1986); R = CV experimental médio dentro dos limites técnicos recomendados; "-" = CV experimental médio fora dos limites técnicos.

A análise dos dados obtidos neste experimento e mostrados no Gráfico 4 demonstram que houve diferença significativa entre os tipos de máquinas avaliados para a variável CV. Percebe-se que a menor variabilidade foi para o conjunto M1 - Trator agrícola com disco centrífugo que operou com faixa útil de 9,0 m. Hachuy (2008) avaliando versões anteriores do mesmo modelo de distribuidor, encontrou para a mesma faixa de aplicação (9,0 m), um CV de 20%. Essa diferença pode ser atribuída ao efeito da inclinação conforme apresentado na Tabela 8, onde em aplicações com a máquina M1 em áreas planas I1 de 0-10° de inclinação, o CV também ficou inferior aos 20%.

Gráfico 4 - Coeficiente de variação x Tipo de conjunto mecanizado



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O conjunto M2 pode ser comparado a distribuidores montados em caminhões já que ambos advêm de adaptações de distribuidores convencionais em chassis rígidos. Para a variável CV, o resultado deste experimento foi maior que aqueles encontrados por Luz et al., 2010; Post; Murray (2019) realizados em áreas agrícolas planas e em menores faixas de aplicação. Essa diferença pode ser atribuída a fatores como as diferentes inclinações avaliadas (ABBOU-OU-CHERIF et al., 2017), bem como operação sob superfície irregular que conforme descrito por Parish (1991), pode elevar em até 3 vezes o CV, quando comparado com operação em superfícies suaves.

Para o conjunto M3, o elevado CV obtido em todas as condições poderia ser minimizado caso fosse adotado algum método de sobreposição de passadas. A aplicação unidirecional com passada única, faz com as porções laterais da faixa que recebem menor insumo, não sejam supridas pela passagem sequencial. Os resultados de CV para o conjunto M3 se assemelham aos valores obtidos na aplicação aérea de calcário (BOŠEĽA; ŠEBEŇ, 2010). Essa semelhança pode ser atribuída a adição de elevado fluxo de ar em ambos os processos, que faz com que o carregamento das partículas finas seja mais expressivo e com isso, a variância seja afetada.

Utilizando o programa de simulação de sobreposições de passadas *Adulança 3.1*, a largura efetiva de trabalho foi calculada para diferentes valores de referência de CV (Tabela 11). Pode-se observar que para o conjunto M1, a largura de trabalho definida operacionalmente foi atingida em todos os tratamentos dentro dos limites de

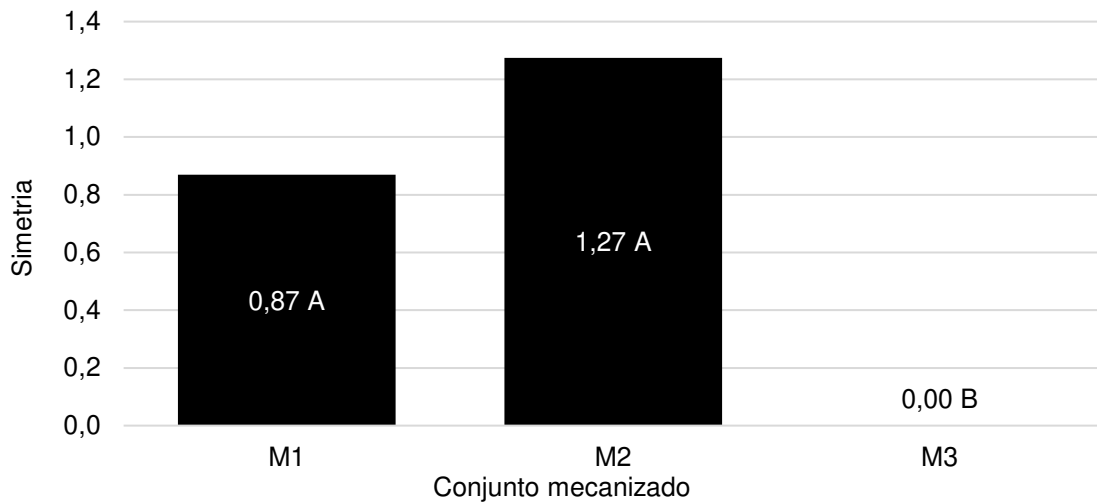
variabilidade definidos. Para o conjunto M2, o resultado foi similar, exceto no tratamento M2I3S1. Para o conjunto M3, nenhum tratamento apresentou resultado inferior aos limites, demonstrando uma baixa qualidade da aplicação com este conjunto nas condições avaliadas.

Tabela 11 - Largura efetiva de trabalho (m) simulada em função do limite de CV

Máquina	Tratamento	Faixa operacional (m)	Coeficiente de Variação (%)				
			10%	15%	20%	25%	30%
M1	M1I1S1	9	10	13	13	13	14
	M1I1S2	9	9	10	10	11	11
	M1I2S1	9	4	7	7	8	9
	M1I2S2	9	7	9	9	10	10
M2	M2I1S1	15	9	14	14	14	15
	M2I1S2	15	7	15	15	15	16
	M2I2S1	15	7	15	15	15	16
	M2I2S2	15	6	10	10	14	15
	M2I3S1	15	12	13	13	14	14
	M2I3S2	15	11	14	14	14	15
M3	M3I1S1	18	-	-	-	-	-
	M3I1S2	18	-	-	-	-	-
	M3I2S1	18	-	-	-	-	-
	M3I2S2	18	-	-	-	-	-
	M3I3S1	18	-	-	-	-	-
	M3I3S2	18	-	-	-	-	-
	M3I4S1	18	-	-	-	-	-
	M3I4S2	18	-	-	-	-	-

Outra variável de importância para a qualidade da distribuição de fertilizantes diz respeito a simetria. Os resultados estão apresentados no Gráfico 5, onde a máquina M3 se destaca por não apresentar *Simetria*, por se tratar de aplicação unidirecional. Para as máquinas M1 e M2, o valor de simetria ficou fora do recomendado por Luz et al. (2010) que afirma que apenas simetrias na faixa de 0,9 a 1,1 são aceitáveis. A ausência de simetria pode ser atribuída às possíveis configurações não ajustadas nos equipamentos (discos e paletas) para otimização da aplicação e pelo efeito do vento Cunha; Soares (2016).

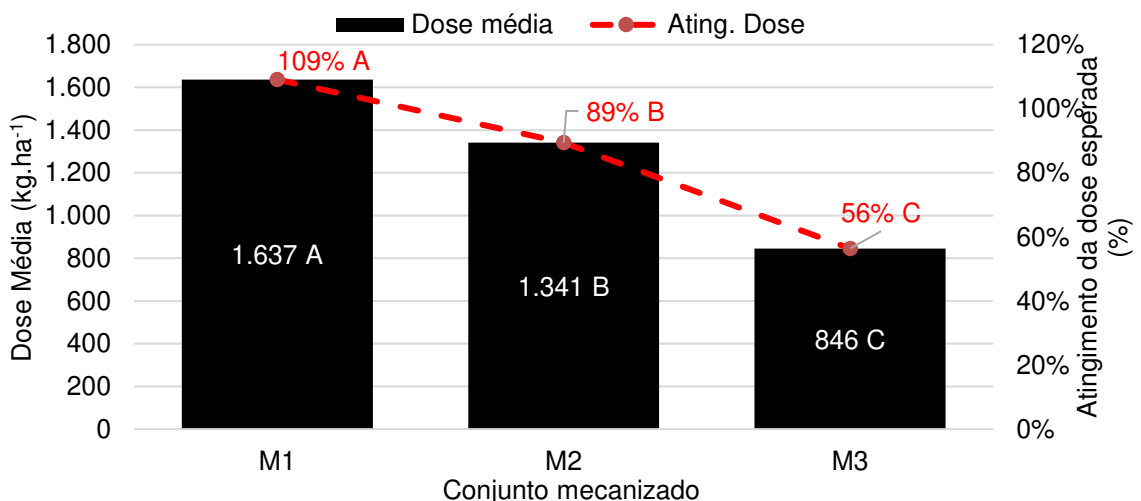
Gráfico 5 - Simetria da faixa de aplicação por tipo de máquinas



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Dunn a 5% de probabilidade.

Além de um padrão homogêneo de distribuição de insumo, espera-se que o sistema mecanizado possa aplicar 100% da dose esperada para qual o equipamento foi previamente calibrado. Luz et al. (2010) consideram que são aceitáveis variações de até 5-10% na dose aplicada de calcário. Ao analisar o Gráfico 6, pode-se observar que o equipamento M1 aplicou 9% a mais que a dose esperada permanecendo dentro do limite aceitável. Os equipamentos M2 e M3 realizaram aplicações abaixo da dose esperada. O conjunto M2 apresentou resultados semelhantes ao de Post; Murray (2019), que obteve atingimento de dose variando de 71 a 97% ao utilizar caminhões com distribuidores centrífugos.

Gráfico 6 - Dose aplicada por tipo de máquina

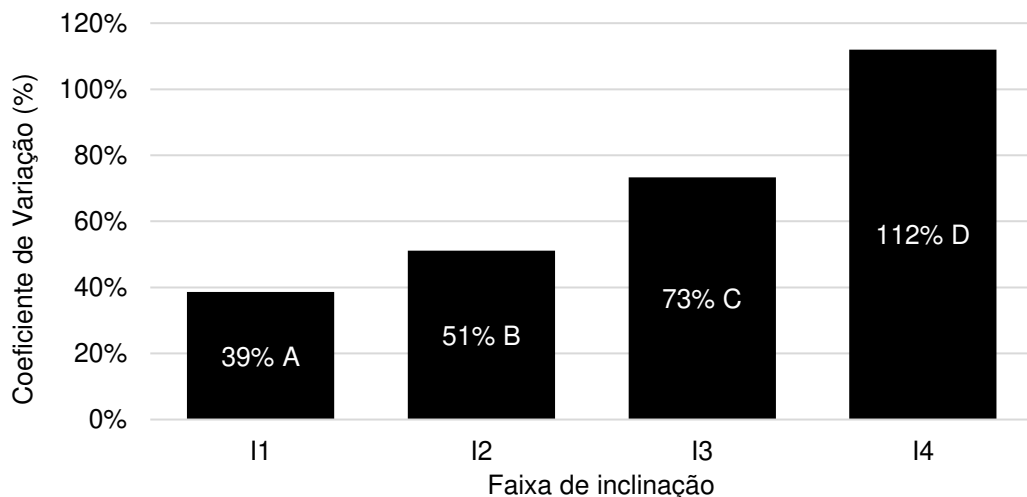


* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.3.2. Inclinação do terreno

De forma geral, equipamentos que operaram em maior faixa de aplicação e em maiores inclinações apresentaram maior CV (Gráfico 7). Esse comportamento condiz com trabalhos como Abbou-Ou-Cherif et al. (2017) que destacam o efeito da inclinação do terreno sobre o padrão de distribuição de fertilizantes sobre o solo. Em complemento, Yule; Grafton (2016) descrevem que faixas mais amplas tendem a ser menos estáveis por serem mais afetadas pelo ambiente e pelas características físicas do fertilizante.

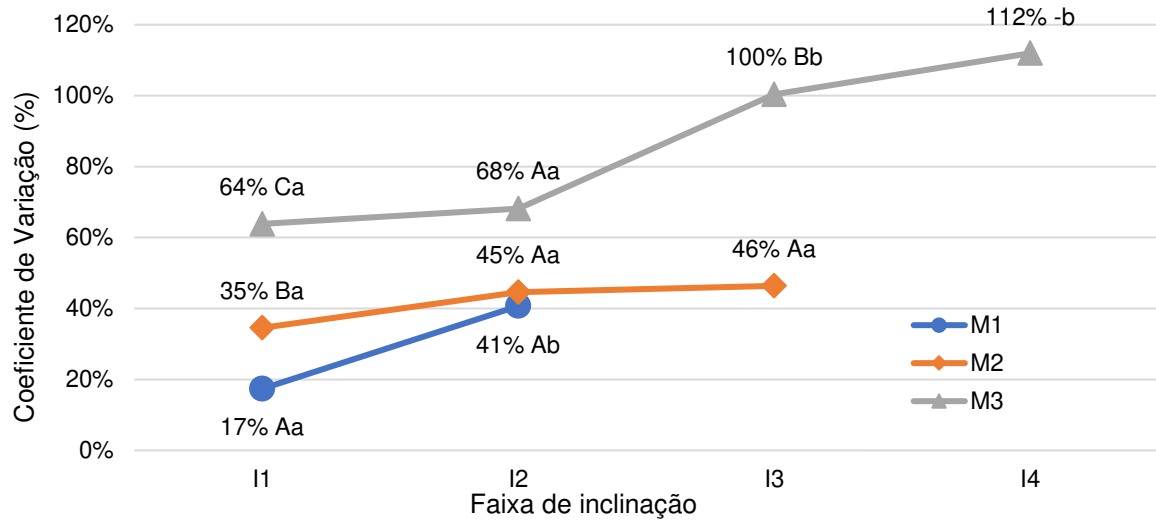
Gráfico 7 - Coeficiente de variação x Inclinação do terreno



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Ao avaliar de forma separada o efeito da inclinação em cada máquina (Gráfico 8), observa-se que a inclinação impactou o resultado em todas as máquinas. Em condições de campo, Yule; Grafton (2016) relatam resultados de CV de 45% como normais na presença de terrenos inclinados e/ou vento. Entretanto, não foram encontrados estudos científicos de operação ou simulação de aplicação de fertilizantes e corretivos em inclinações superiores a 20° e por isso, faltam comparações para os resultados obtidos em faixas de inclinação superiores. Para a máquina M1, a mudança de inclinação foi altamente impactante no resultado.

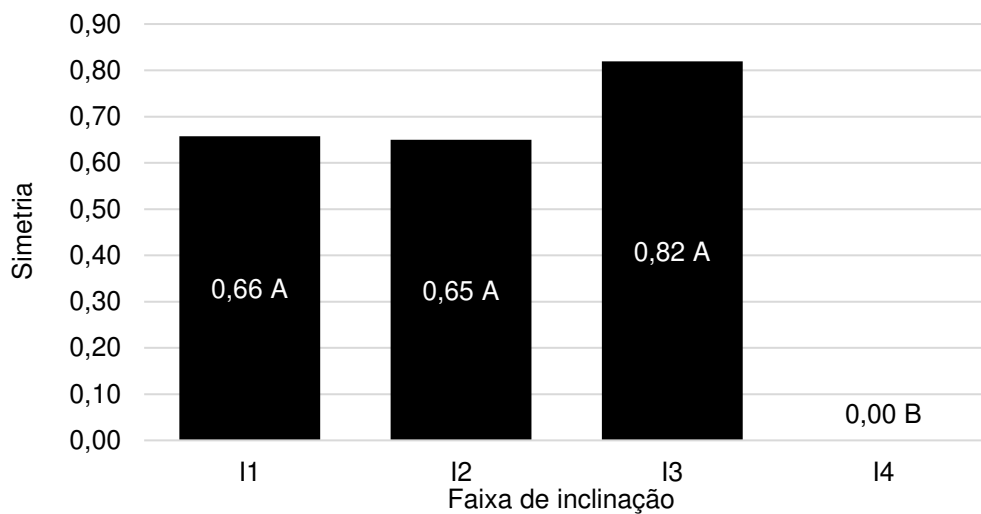
Gráfico 8 - Comportamento do conjunto mecanizado para cada faixa de inclinação



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula dentro de cada inclinação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; Médias seguidas de uma mesma letra minúscula dentro de cada máquina não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

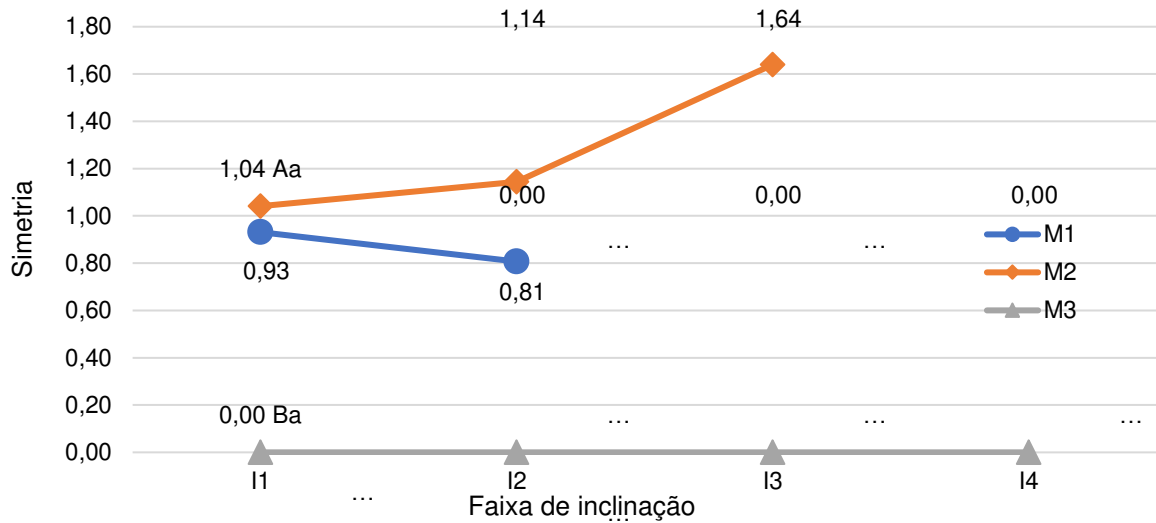
Para a variável Simetria, o resultado médio por inclinação torna-se deformado já que o conjunto mecanizado M3 é unidirecional com simetria nula e por isso, influente no resultado acumulado (Gráfico 9). Ao avaliar a simetria segregada por tipo de máquina (Gráfico 10), observa-se que na faixa de inclinação I1, ambas máquinas M1 e M2 apresentaram valores dentro dos limites recomendados de 0,9 a 1,1. Com o aumento da inclinação, a simetria piorou em todos os conjuntos.

Gráfico 9 - Simetria x Faixa de inclinação



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Dunn a 1% de probabilidade

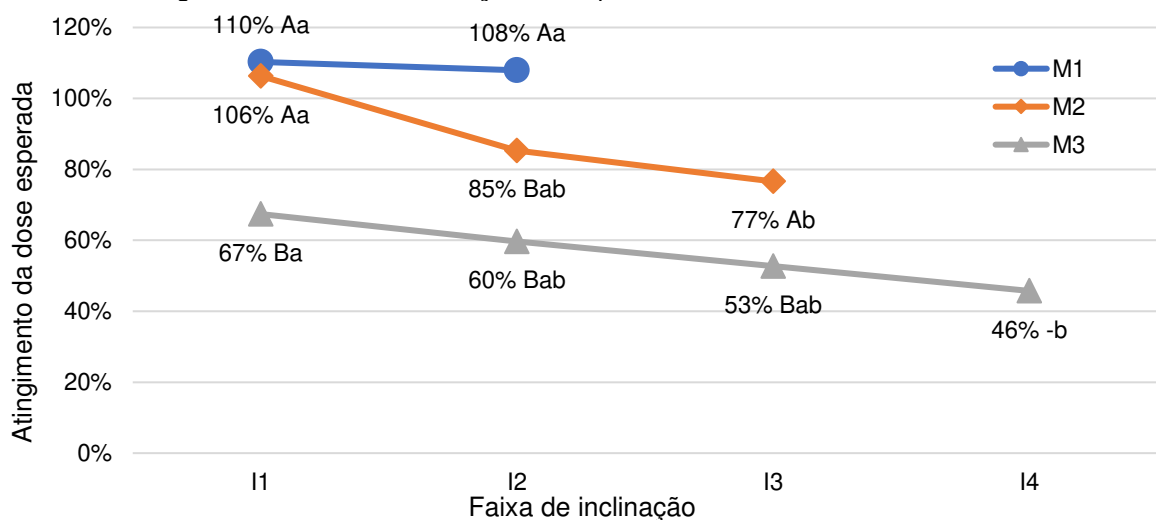
Gráfico 10 - Simetria x Inclinação e Máquina



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula dentro de cada inclinação não diferem entre si pelo teste de Dunn a 5% de probabilidade; Médias seguidas de uma mesma letra minúscula dentro de cada máquina não diferem entre si pelo teste de Dunn a 5% de probabilidade

Em relação a dose aplicada ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e atingimento da dose esperada, apenas o conjunto M1 conseguiu permanecer dentro dos limites aceitáveis de desvio mesmo com a mudança de inclinações (Gráfico 11). Para o conjunto M2 que inicialmente operou dentro dos limites, o acréscimo de inclinação do terreno gerou drástica redução do volume de calcário aplicado. Para o conjunto M3, os valores de atingimento de dose sempre foram menores que o esperado e decresceram com o aumento da inclinação.

Gráfico 11 - Atingimento de dose x Inclinação e máquina

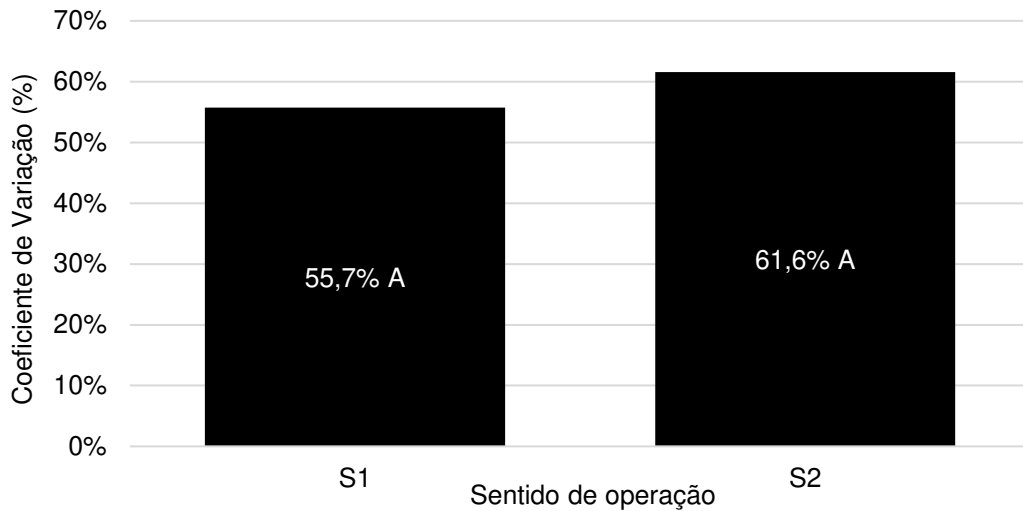


* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula na vertical dentro de cada inclinação não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade; Médias seguidas de uma mesma letra minúscula dentro de cada máquinas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

4.3.3. Sentido de aplicação

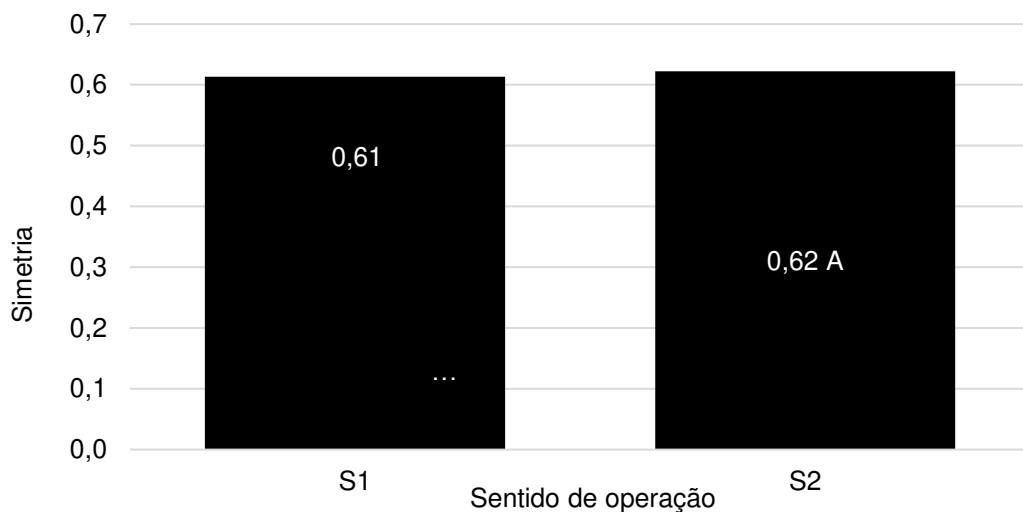
Não houve diferença estatística do efeito de sentido de aplicação sobre o coeficiente de variação analisado (Gráfico 12) e nem sobre a simetria (Gráfico 13). Entretanto, aplicações com sentido S1, apresentaram uma dose média 21,2% superior ao sentido S2 (Gráfico 14). Esse resultado foi inferior ao descrito por Yule; Grafton (2016) para fertilizantes, que consideraram normal uma dose 50% maior da aplicação com o equipamento voltado para baixo em uma superfície inclinada.

Gráfico 12 - Coeficiente de variação x Sentido de operação



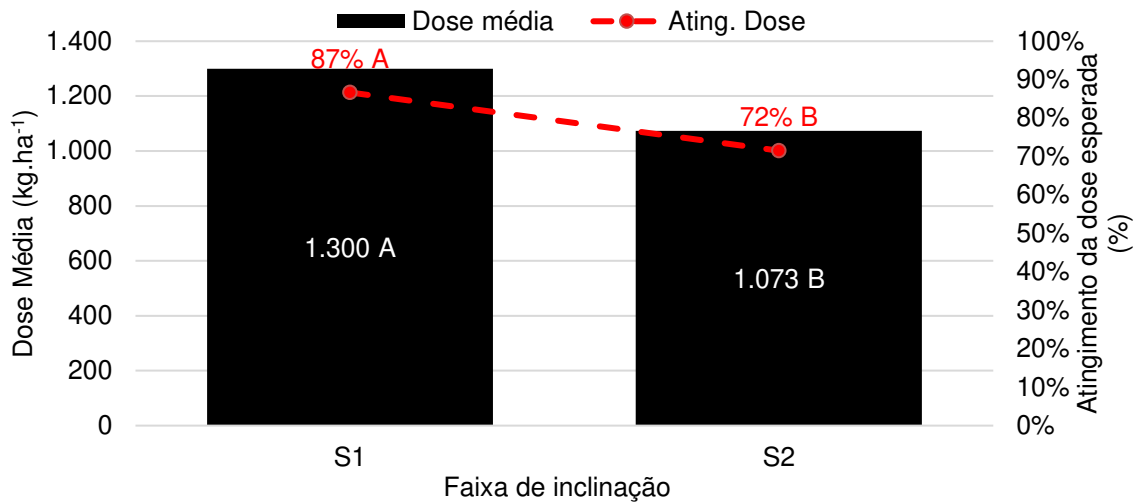
* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Gráfico 13 – Simetria x Sentido de operação



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

Gráfico 14 - Dose média e atingimento de dose x Sentido de operação



* Médias seguidas de uma mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

De acordo com Abbou-Ou-Cherif et al. (2017), a posição longitudinal positiva (descendo) ou negativa (subindo) do equipamento influencia a projeção de partículas após o mecanismo distribuidor por inserir uma componente vertical inexistente nas operações em áreas planas. Esse fator aumenta a exposição de partículas finas às condições ambientais e provoca um efeito de deriva de aplicação mais pronunciado. Os mesmos autores esperam uma maior faixa de aplicação na operação descendo, onde a gravidade atua como força motriz impulsionadora para as partículas, o que condiz com os maiores volumes aplicados nessa posição.

Todavia, os estudos comparativos considerados foram feitos utilizando distribuidores com dosadores de queda livre. Ao utilizar dosadores volumétricos de esteira, o efeito da posição longitudinal tende a ser mais influente ainda, conforme observado por Spagnolo et al. (2021) utilizando dosadores volumétricos helicoidais, devido a inserção de um componente longitudinal de movimentação do insumo. A análise comparativa do sentido de operação sobre os demais tratamentos e variáveis está apresentada nos Gráficos 15, 16 e 17 a seguir.

Gráfico 15 - Resultados de Coeficiente de Variação (%) x Tratamento

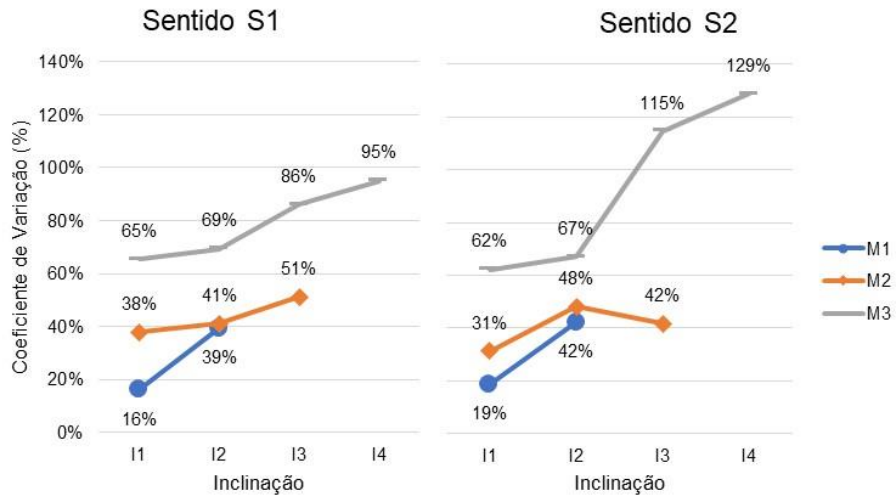


Gráfico 16 - Resultados de Atingimento de dose (%) x Tratamento

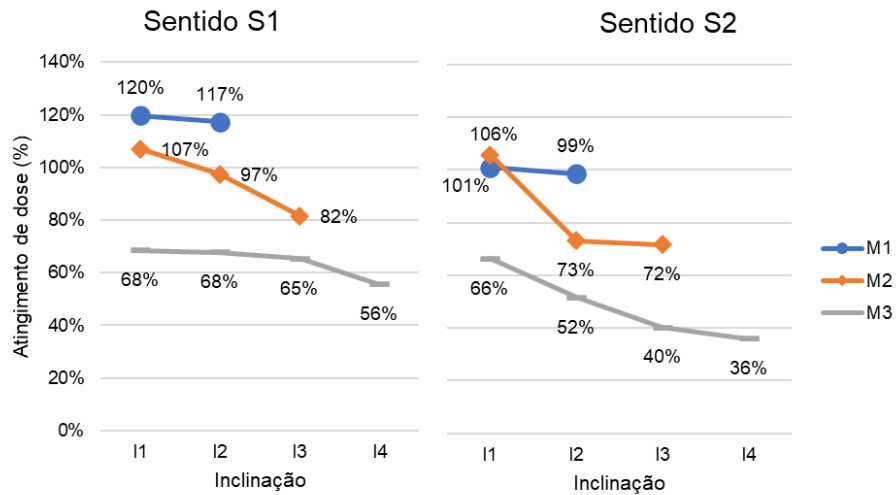
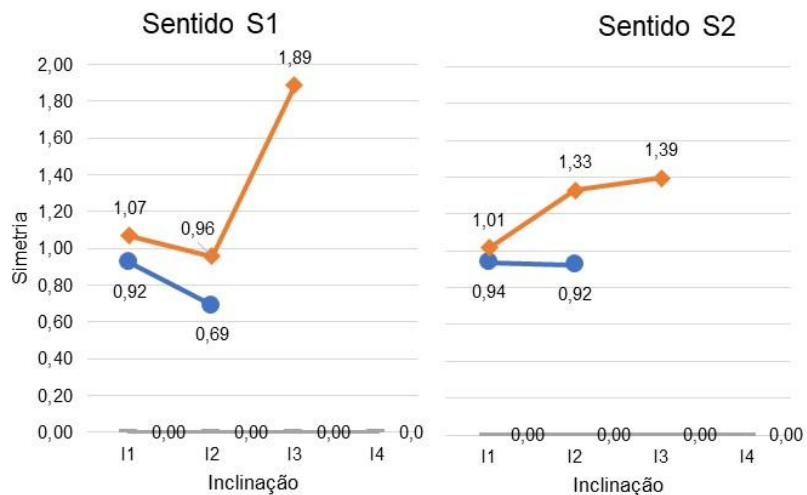


Gráfico 17 - Resultados de Simetria x Tratamento



Ao avaliar todo o experimento realizado, observa-se um elevado coeficiente de variabilidade, crescente com o aumento da inclinação e afetado de forma não sistemática pelo sentido de trabalho. Várias variáveis podem ter impactado no resultado como um todo e de onde se destacam as condições de superfície florestal que são bem diferentes dos ambientes agrícolas das tradicionais pesquisas científicas. Parish (1991) destaca o efeito da superfície do solo sobre a variabilidade da distribuição, onde terrenos irregulares geraram um CV de até 30% comparado com superfícies macias e regulares que o valor ficou abaixo dos 10%. Esse aumento de variabilidade pela superfície pode ter contribuído para parte dos elevados valores de CV.

Outra consideração importante é que os resultados de coeficiente de variação terem sido maiores que a literatura convergem com o pensamento de Yule; Grafton (2016) que abordam que “CV de campo” esperado é significativamente maior que o “CV de testes”. Um dos motivos dessa diferença refere-se ao efeito do vento. Apesar de considerar que o vento em condições moderadas é bem menos impactante que a inclinação do terreno na aplicação de fertilizantes, Yule; Grafton (2016) descrevem que se espera maior quantidade de produto aplicado a sota-vento que contra o vento. Essa fonte de variabilidade afeta a simetria e variabilidade da faixa de aplicação a depender não só da velocidade do vento em si, mas também deste em relação ao sentido da aplicação.

4.3.4. Correlação entre variáveis

A única relação entre variáveis que apresentou significância a 5% de probabilidade pelo teste de *Pearson* foi a combinação CV x Atingimento de dose (Gráfico 18). As combinações CV x Simetria (Gráfico 19), e Atingimento de dose x Simetria (Gráfico 20) foram comprometidas devido aos valores nulos de simetria para a operação unidirecional do conjunto M3.

De forma geral, a eficiência dos equipamentos em atingir a dose esperada por unidade de área apresentou padrão inversamente proporcional a variável CV, ou seja, modelos de operação com maiores coeficientes de variação também apresentaram menor dose aplicada. A relação entre as duas variáveis avaliadas pode ser descrita

peelo modelo da Equação 1 a seguir, com coeficiente de determinação (R^2) de 49,22% e coeficiente de correlação (r) de -0,70, significativo a 5% no teste de *Pearson*.

$$Y = 1,14 - 0,61x$$

(1)

Gráfico 18 - Correlação entre CV% e Atingimento de dose esperada

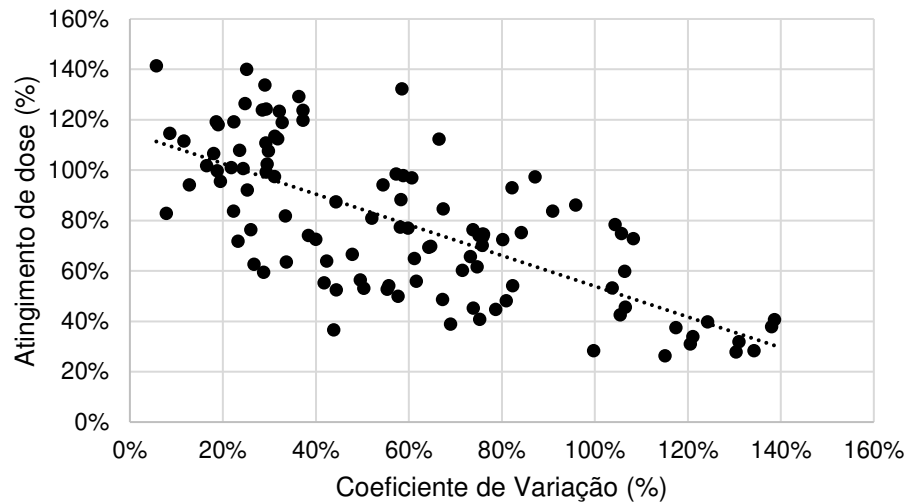


Gráfico 19 - Correlação entre CV% e Simetria

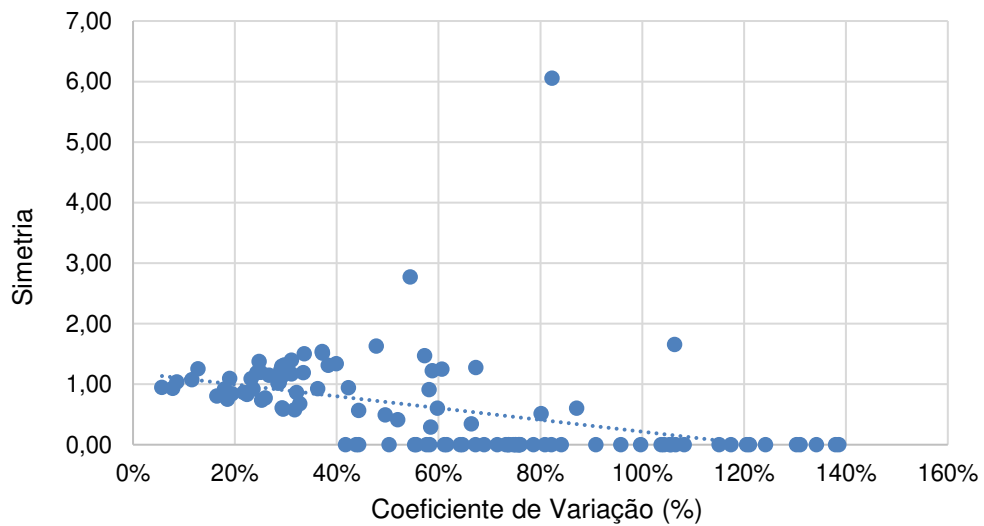
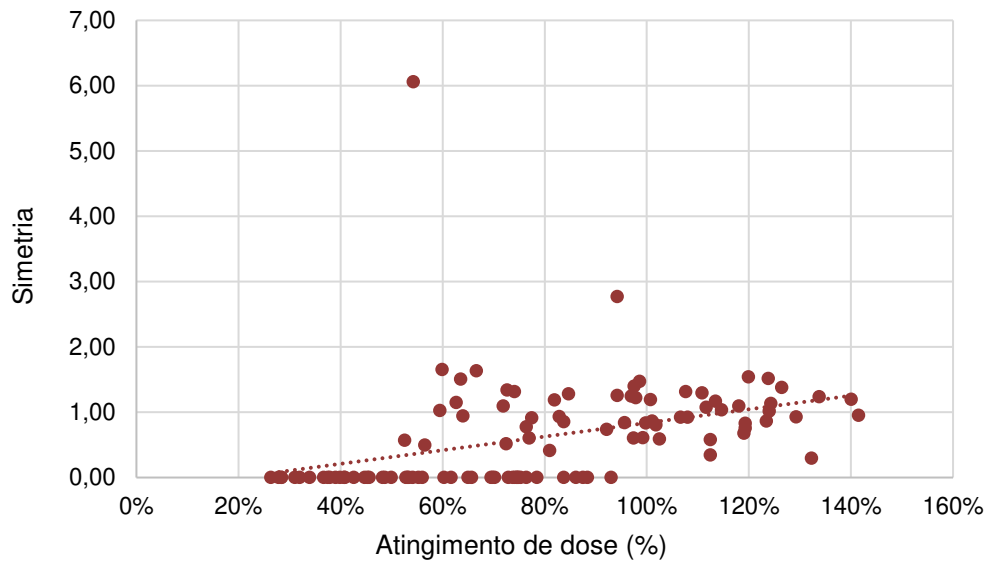


Gráfico 20 - Correlação entre Simetria e Atingimento de dose esperada



5. CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho pode-se concluir que:

- Os resultados de coeficiente de variação da distribuição transversal de calcário foram superiores aos padrões médios obtidos nas culturas agrícolas.
- Admitindo-se o limite de CV de 20%, apenas o conjunto M1 em áreas planas atendeu a faixa prevista. Em maiores inclinações, todas as máquinas extrapolaram o limite.
- A inclinação das áreas foi o que mais influenciou os parâmetros de qualidade de distribuição.
- O sentido de aplicação foi pouco influente no coeficiente de variação, porém bastante significativo na dose aplicada.
- O conjunto mecanizado Trator agrícola com distribuidor pneumático apresentou baixa qualidade de aplicação em todas as condições avaliadas e por isso, faz necessário o desenvolvimento, ajustes e melhorias para atendimento as exigências técnicas.
- O trabalho de campo corroborou com resultados experimentais e por isso contribui de forma significativa tanto para o meio técnico-científico.

6. REFERÊNCIAS

- ABBOU-OU-CHERIF, E. M. et al. On-the-field simulation of fertilizer spreading: Part 2 – Uniformity investigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 141, p. 118–130, 2017.
- AFSA. **Accu-Spread — Code of Practice for Spreading**. Glenthompson: Australian Fertiliser Services Association, 2001.
- ALMADO, R. P. Intensificação da mecanização e da automação em atividades silviculturais na Arcelormittal bioflorestas. **Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 7–21, 2013.
- ALMEIDA, R. A. S. DE. **Influência da umidade de dois calcários sobre a distribuição a lanço com equipamento centrifugo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura)—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2018.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 115–123, 2004.
- ANDRADE, A. D. et al. Characterization of the transverse distribution of fertilizer in coffee plantations. **Agronomy**, v. 10, n. 4, 1 abr. 2020.
- ASABE STANDARDS. **S341.5: Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders**. St. Joseph, Michigan, USA: ASABE, 2018.
- BAIO, F. H. R.; MOLIN, J. P.; LEAL, A. J. F. Avaliação comparativa da distribuição transversal de adubos sólidos aplicados em culturas anuais. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, p. 527–536, jul. 2012.
- BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole, 1987.
- BALASTREIRE, L. A.; COELHO, J. L. D. **Aplicação mecanizada de fertilizantes e corretivos**. São Paulo/SP: ANDA, 2000.
- BARACĆ, S. R. et al. **Analysis of transverse distribution of fertilizers granules spread by using some spreaders**. International Symposium On Agricultural Engineering. **Proceedings...**Opatija, Croatia: 2014.
- BARAK, P. et al. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. **Plant and Soil**, v. 197, p. 61–69, 1997.
- BARROS, A. C. DE et al. Mapeamento da aptidão agrícola das terras por meio de análise multicritério. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 2, p. 295–304, 2019.

BAUER, P. J.; SZOGI, A. A.; SHUMAKER, P. D. Fertilizer Efficacy of Poultry Litter Ash Blended with Lime or Gypsum as Fillers. **Environments**, v. 6, n. 5, p. 50, 1 maio 2019.

BECHMANN, M. E. et al. Phosphorus transfer from agricultural areas and its impact on the eutrophication of lakes - Two long-term integrated studies from Norway. **Journal of Hydrology**, v. 304, n. 1–4, p. 238–250, 2005.

BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, n. September, p. 271–283, 2017.

BOŠEĽA, M.; ŠEBEŇ, V. Analysis of the aerial application of fertilizer and dolomitic limestone. **Journal of Forest Science**, v. 56, n. 2, p. 47–57, 2010.

BROWN, P. H.; ZHAO, F.-J.; DOBERMANN, A. What is a plant nutrient? Changing definitions to advance science and innovation in plant nutrition. **Plant Soil**, v. 476, p. 11–23, 2022.

CAIRES, E. F. et al. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. **European Journal of Agronomy**, v. 66, p. 41–53, 2015.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 3–12, 2006.

CANNELL, M. G. R. Plantation Silviculture | Short Rotation Forestry For Biomass Production. Em: JEFFERY BURLEY (Ed.). **Encyclopedia of Forest Sciences**. Oxford: Academic Press, 2004. p. 872–877.

CASTILHO, A. S. et al. **Colheita de madeira em áreas com relevo acidentado utilizando equipamento de alta performance**. Seminário de Atualização: Sistema de colheita de madeira e transporte florestal. **Anais...Malinovski Florestal**, 2014.

CENIBRA. **Dados climáticos internos - 2000-2022 (Relatório não-publicado)**. Belo Oriente: CENIBRA, 2023.

COELHO, J. L. D. et al. **Avaliação do desempenho de máquinas aplicadoras a lanço na distribuição de gesso agrícola**. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...Santa Maria: SBEA/UFMS**, 1992.

COETZEE, C. J.; LOMBARD, S. G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertiliser spreader. **Biosystems Engineering**, v. 109, n. 4, p. 308–325, 2011.

COOL, S. R. et al. Determining the effect of wind on the ballistic flight of fertiliser particles. **Biosystems Engineering**, v. 151, p. 425–434, 2016a.

COOL, S. R. et al. Comparing different methods of using collecting trays to determine the spatial distribution of fertiliser particles. **Biosystems Engineering**, v. 150, p. 142–150, 1 out. 2016b.

COOL, S. R. et al. Development of a stereovision-based technique to measure the spread patterns of granular fertilizer spreaders. **Sensors**, v. 17, n. 6, p. 1–23, 2017.

CROZIER, C. R.; ROBERSON, G. T. Granular Fertilizer Spreader Swath Uniformity Achieved at Varying Target Application Rates. **Crop Management**, v. 13, n. 1, p. 1–6, 1 jan. 2014.

CUNHA, J. P. A. R.; SOARES, R. Broadcast distribution uniformity of fertilizer with centrifugal spreaders used in variable rate application. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 5, p. 928–937, 2016.

CURTI, L. S. P.; COSTA, M. R. Desenvolvimento e desafios da mecanização e da automação na CENIBRA. **Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 29–37, 2013.

DAYSTAR, J. et al. Environmental life cycle impacts of cellulosic ethanol in the Southern U.S. produced from loblolly pine, eucalyptus, unmanaged hardwoods, forest residues, and switchgrass using a thermochemical conversion pathway. **Fuel Processing Technology**, v. 138, p. 164–174, 2015.

DELL, B. et al. **Nutrient disorders in plantation Eucalypts**. 2. ed. Canberra: ACIAR, 2000.

DINTWA, E. et al. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertiliser spreader. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 4, p. 407–415, 2004.

DUARTE, C. C. **Redimensionamento de distribuidor pendular para grandes vazões de calcário**. Dissertação (Mestrado em Ciências)—Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2019.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

FARRET, I. S. et al. Variação da regulagem no perfil transversal de aplicação com distribuidores centrífugos. **Ciência Rural**, v. 38, n. 7, p. 1886–1892, out. 2008.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)**. R package version 1.2.2, 2021.

FLORES, E. F. **Análise de máquinas agrícolas distribuidoras de fertilizantes segundo requisitos projetuais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2008.

FOLLET, R. H.; MURPHY, L. S.; DONAHUE, R. I. **Fertilizer and soil amendments**. New Jersey, EUA: Prentice-Hall Inc., 1981.

FOX, J.; WEISBERG, S. **An {R} Companion to Applied Regression**. Thousand Oaks, USASAGE Publications Inc., 2019.

GALVÃO, C. B. et al. Fertilizer metering mechanism with helical conic cylindrical thread for family agriculture. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 6, p. 934–940, 2018.

GANASCINI, D. et al. O efeito da rotação dos discos no perfil de distribuição. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 4, p. 63–73, 2016.

GARCIA, A. P.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Auger-type granular fertilizer distributor: mathematical model and dynamic simulation. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 1, p. 151–163, jan. 2012.

GARCIA, L. C. et al. Performance of fertilizer metering mechanism of planters as a function of longitudinal inclination. **Engenharia Agrícola**, v. 37, n. 6, p. 1155–1162, 2017.

GAZEY, C.; DAVIES, S. **Soil acidity: a guide for WA farmers and consultants**. Perth, Austrália: Department of Agriculture and Food, 2009.

GELLERSTEDT, S.; DAHLIN, B. Cut-To-Length: The Next Decade. **Journal of Forest Engineering**, v. 10, n. 2, p. 17–24, 1999.

GEORGE, H. **Adoption of precision agriculture technologies for fertiliser placement in New Zealand**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola)—Palmerston North, New Zealand: Massey University, 2007.

GODOY, M. J. S.; LOPES-ASSAD, M. L. Aptidão agrícola de terras com estimativa de risco climático para a cultura do milho utilizando geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 26, p. 685–694, 2002.

GONÇALVES, J. L. DE M. **Fertilização de Plantações de Eucalipto**. (J. L. M. Gonçalves et al., Eds.). II Encontro Brasileiro de Silvicultura. **Anais...**Campinas: IPEF, 2011.

GONÇALVES, J. L. DE M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6–27, 2013.

GRAFTON, M. C. E. et al. **The effect of field conditions on in-field spread patterns from twin disk spreaders**. 2015 ASABE International Meeting. **Proceedings...**St. Joseph, Michigan: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 26 jul. 2015.

GRAFTON, M. C. E.; YULE, I. J.; MANNING, M. J. A review of the economic impact of high levels of variance in fertiliser spreading systems. **NZ Grassland Association**, v. 75, p. 131–136, 2013.

GRIFT, T. E. et al. Dynamic friction coefficient measurement of granular fertiliser particles. **Biosystems Engineering**, v. 95, n. 4, p. 507–515, 2006.

GROSS, J.; LIGGES, U. **nortest: Tests for Normality**. R package version 1.0-4, , 2015.

GRUNWALDT, H. S. et al. Study of the relation between Mg content and dissolution kinetics of natural lime stone using μ XRF, μ XRD and μ XAS. **Journal of Physics: Conference Series**, n. 712, p. 4, 2016.

GUERRA, S. P. S.; OGURI, G.; MASCHETTI, S. H. **Levantamento do nível de mecanização da silvicultura: edição 2018-2019**. Piracicaba: IPEF, 2020.

HACHUY, L. **Desempenho de uma distribuidora a lanço com dois tipos de produtos aplicados em diferentes posições de aletas nos discos**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)—Botucatu: UNESP, 2008.

HALL, P.; JAMIESON, D.; BYATTZ, N. The Rotree spot cultivator-moulder. **Report LIRO**, v. 22, n. 1, p. 1–7, 1997.

HIGGINS, S. F. **Comparison of variable-rate granular application equipment** ASAE Paper No. 031125. St. Joseph, EUA: ASAE, 2003.

HIJAZI, B. et al. High speed stereovision setup for position and motion estimation of fertilizer particles leaving a centrifugal spreader. **Sensors**, v. 14, n. 11, p. 21466–21482, 2014.

HORROCKS, A. et al. **Developing guidelines for fertiliser spreading on West Coast humps and hollows**. 28th Annual Fertiliser and Lime Research Centre Workshop. **Proceedings...** Palmerston North, New Zealand: University of New Zealand, 2015.

HWANG, S. J. et al. Spray pattern analysis for a centrifugal fertilizer distributor with two shutter holes. **Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers**, v. 18, n. 10, p. 8–19, 31 out. 2019.

IBÁ. **Relatório Anual 2022** IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores. Brasília: IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores, 2022.

IKKA, T. et al. Effect of aluminum on metabolism of organic acids and chemical forms of aluminum in root tips of *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. **Phytochemistry**, v. 94, p. 142–147, 2013.

ISO. **ISO 5690-1:1985- Equipment for distributing fertilizers — Test methods — Part 1: Full width fertilizer distributors**. Gêneze: ISO - International Organisation for Standardisation, 1985.

JONES, J. R.; LAWRENCE, H. G.; YULE, I. J. A statistical comparison of international fertiliser spreader test methods — Confidence in bout width calculations. **Powder Technology**, v. 184, n. 3, p. 337–351, 2 jun. 2008.

KAMINSKI, J. et al. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 573–580, 2005.

KASSAMBARA, A. **ggpubr: “ggplot2” Based Publication Ready Plots**. R package version 0.6.0, , 2023a.

KASSAMBARA, A. **rstatix: Pipe-Friendly Framework for Basic Statistical Tests**. R package version 0.7.2, , 2023b.

KHUDHER, A. Y.; HIMOUD, S. M.; ALMALIKI, S. A. Modulating a centrifuge spreader disc and evaluating performance under some different operating factors. **International Journal of Agricultural and Statistical Sciences**, v. 16, n. 1, p. 1799–1805, 2020.

KIM, J. M.; WOO, D.; KIM, T. Analysis on fertilizer application uniformity of centrifugal fertilizer distributor. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 43, n. 4, p. 420–425, 2018.

KIMMINS, J. P. Evaluation of the consequences for future tree productivity of the loss of nutrients in whole-tree harvesting. **Forest Ecology and Management**, v. 1, p. 169–183, jan. 1976.

KOKO, J.; VIRIN, T. Optimization of a fertilizer spreading process. **Mathematics and Computers in Simulation**, v. 79, n. 10, p. 3099–3109, 2009.

KWEON, G. et al. Analysis and control of uniformity by the feed gate adaptation of a granular spreader. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 34, n. 2, p. 95–105, 25 abr. 2009.

LAGHARI, M. et al. Calibration and Performance of Tractor Mounted Rotary Fertilizer Spreader. **International Journal of Advanced Research**, v. 2, n. 4, p. 839–846, 2014.

LEITE, E. DA S. **Modelagem técnica e econômica de um sistema de colheita florestal mecanizada de toras curtas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)—Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012.

LEITE, F. **Construção de um inclinômetro para avaliar o efeito da declividade lateral no desempenho de tratores agrícolas**. Tese (Doutorado em Agronomia)—Botucatu/SP: Universidade Estadual Paulista, 2007.

LEPSCH, I. F. et al. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 4^a Aproxim ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

LIPING, Z.; LIXIN, Z.; WEIQIANG, Z. Fertilizer feeding mechanism and experimental study of a spiral grooved-wheel fertilizer feeder. **Journal of Engineering Science and Technology Review**, v. 11, n. 6, p. 107–115, 2018.

LUZ, P. H. DE C. et al. Otimização da aplicação de corretivos agrícolas. **Informações Agrônomicas**, n. 129, p. 1–13, 2010.

LV, H.; YU, J.; FU, H. Simulation of the operation of a fertilizer spreader based on an outer groove wheel using a discrete element method. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 58, n. 3–4, p. 842–851, 2013.

MACANA, Y. A. M. et al. Soil fertility, root growth, and Eucalypt productivity in response to lime and gypsum applications under soil water deficit. **New Forests**, p. 1–20, 21 out. 2022.

MACHADO, A. L. T. et al. **Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**. Pelotas: UFPel, 1996.

MACPHAIL, M. et al. How old are the eucalypts? A review of the microfossil and phylogenetic evidence. **Australian Journal of Botany**, v. 64, n. 8, p. 579–599, 25 nov. 2016.

MAEDA, S. et al. **Estudo dos materiais calcários usados como corretivos da acidez do solo em Mato Grosso do Sul**. Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1996.

MAGNI, R. S. **Avaliação da qualidade da distribuição de calcário por distribuidores centrífugo e gravimétrico**. Santa Maria/RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

MALHEIROS, R. R.; QUEIROZ, D. Intensificação da mecanização e da automação em atividades silviculturais na Ramires Reflorestamentos. **Série Técnica IPEF**, v. 17, n. 38, p. 57–61, 2013.

MALINOVIĆ, N.; MEŠI, M.; KOSTIĆ, M. Impact characteristics of mineral fertilizers to flow and surface distribution uniformity. **Contemporary Agricultural Engineering**, v. 37, n. 4, p. 334- 438 (Em Sérvio), 2011.

MAPA. **Instrução Normativa Nº 39, de 8 de Agosto de 2018**. Ficam estabelecidas as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, registro de produto, autorizações, embalagem, rotulagem, documentos fiscais, propaganda e tolerâncias dos fertilizantes minerais destinados à agricultura, na forma desta Instrução Normativa e seus Anexos I a V. Brasília: Ministro de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/36278414/do1-2018-08-10-instrucao-normativa-n-39-de-8-de-agosto-de-2018-36278366>. Acesso em: 30 ago. 2021.

MARCHIORI, J. N. C. Primórdios da silvicultura no Rio Grande do Sul. 1 – Nota sobre a introdução do gênero *Eucalyptus* L’Her. **Balduinia**, v. 0, n. 44, p. 21–31, 2014.

MÁRQUEZ, L. **Maquinaria para la preparación del suelo, la implantación de los cultivos y la fertilización**. Madrid: Blake y Helsey, 2001.

MASHADI, B.; NASROLAHI, H. Automatic control of a modified tractor to work on steep side slopes. **Journal of Terramechanics**, v. 46, n. 6, p. 299–311, 2009.

MATOS, G. S. B. et al. Desenvolvimento inicial e estado nutricional de clones de eucalipto no nordeste do Pará. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 4, p. 491–500, 2012.

MENDIBURU, F. **agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research**. R package version 1.3-5, , 2021.

MERINO, A. et al. Nutrition and growth in newly established plantations of *Eucalyptus globulus* in northwestern Spain. **Annals of Forest Science**, v. 60, p. 509–517, 2003.

MOLIN, J. Adubo no lugar certo. **Revista Cultivar**, p. 12–15, 2002.

MOLIN, J. P.; MAZZOTTI, H. C. Influência da utilização e do tipo de amortecedores de ricochete em ensaios de aplicadores a lanço. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 4, n. 2, p. 281–285, 2000.

MORSE, J. W.; ARVIDSON, R. S. The dissolution kinetics of major sedimentary carbonate minerals. **Earth-Science Reviews**, v. 58, n. 1–2, p. 51–84, 2002.

MURPHY, D. J.; BEPPLER, D. C.; SOMMER, H. J. Tractor stability indicator. **Applied Ergonomics**, v. 16, n. 3, p. 187–191, 1985.

NGUYEN, N. T. et al. Role of exudation of organic acids and phosphate in aluminum tolerance of four tropical woody species. **Tree Physiology**, v. 23, n. 15, p. 1041–1050, 2003.

NSAC. **GB/T5262-2008, Measuring methods for agricultural machinery testing conditions— General rules**. Beijing, China: China Agricultural Press, 2008.

NZFQC. **Spreadmark code of practice for the placement of fertiliser in New Zealand**. Ashburton, New Zealand: New Zealand Fertiliser Quality Council, 2006.

OLIESLAGERS, R.; RAMON, H.; DE BAERDEMAEKER, J. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model. **Journal of Agricultural and Engineering Research**, v. 63, n. 2, p. 137–152, 1996.

ORTIZ-CANAVATE, J. **Las Maquinas Agrícolas y Su Aplicacion**. 6. ed. Madrid: Editora Mundi-Prensa, 1994.

PAGE-DUMROESE, D. S. et al. Development and use of a commercial-scale biochar spreader. **USDA Forest Service - General Technical Report RMRS-GTR**, p. 1–10, 2016.

PARISH, R. L. Effect of rough operating surface on rotary spreader distribution pattern. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 7, n. 1, p. 61–63, 1991.

PARISH, R. L. Effect of impeller angle on pattern uniformity. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 19, n. 5, p. 531–533, set. 2003.

PEREIRA, D. P.; FIEDLER, N. C.; LIMA, J. S. D. S. Lateral stability limits of farm tractors for forest plantations in steep areas. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 92, p. 433–439, 2011.

PETTERSEN, J. M.; SVENDSEN, J. A.; ØVLAND, S. A method of studying the influence of fertilizer particle size on the distribution from a twin-disc spreader. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 50, n. C, p. 291–303, 1 set. 1991.

PINHEIRO NETO, R.; OLIVEIRA, N. V. DE; CABELEIRO, F. C. C. Otimização de um distribuidor de calcário por gravidade. **Acta Scientiarum**, v. 22, n. 4, p. 1065–1068, 8 maio 2000.

POSIT TEAM. **RStudio: Integrated Development Environment for R**. Boston, EUAPosit Software, PBC, , 2022.

POST, S. L.; MURRAY, R. Effective bout widths for uniform spread of lime from ground spreaders. Em: CHRISTENSEN, C. L.; CURRIE, L. D. (Eds.). **Nutrient loss mitigations for compliance in agriculture**. Palmerston North, New Zealand: Occasional Report No. 32. Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University, 2019. p. 16.

PRIMO, M. A. et al. Evaluation of alternative containers to determining the working width of fertilizer spreaders. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 3, p. 525–534, 2008.

PRZYWARA, A. et al. Experimental study of disc fertilizer spreader performance. **Agriculture**, v. 10, n. 10, p. 467, 12 out. 2020.

QUEIROZ, L. R. DE S.; BARRICHELO, L. E. G. **Árvores no Brasil – O eucalipto – Um século no Brasil – 1908/2008**. São Paulo: Antonio Bellini Editora & Cultura, 2007.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Viena, AustriaR Foundation for Statistical Computing, , 2022.

RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1994.

REETZ JR, H. F. **Fertilizantes e o seu uso eficiente**. São Paulo: ANDA, 2017.

REUMERS, J.; TIJSKENS, E.; RAMON, H. Experimental characterisation of the tangential and cylindrical fertiliser distribution pattern from a spinning disc: A parameter study. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 3, p. 327–337, 2003a.

REUMERS, J.; TIJSKENS, E.; RAMON, H. Experimental characterisation of the cylindrical distribution pattern of centrifugal fertiliser spreaders: Towards an alternative for spreading hall measurements. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 4, p. 431–439, 1 dez. 2003b.

REVELLE, W. **psych: Procedures for Psychological, Psychometric, and Personality Research**. Evanston, USANorthwestern University, R package version 2.2.9, , 2022.

REYNALDO, É. F. et al. Distribuição de fertilizantes a lanço em função da qualidade do insumo. **Energia na Agricultura**, v. 31, n. 1, p. 24, 20 abr. 2016.

RINKER, T. W.; KURKIEWICZ, D. **pacman: Package Management for R**. Buffalo, USAversion 0.5.0, , 2018.

ROCHA, J. H. T.; DU TOIT, B.; GONÇALVES, J. L. DE M. Ca and Mg nutrition and its application in Eucalyptus and Pinus plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 442, n. March, p. 63–78, 2019.

RODRIGUES, F. A. V. et al. Produtividade de eucalipto aos 18 meses de idade, na região do Cerrado, em resposta à aplicação de cálcio, via calcário e gesso agrícola. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, 1 mar. 2016.

ROSA, D. P. DA et al. Methodology to evaluate the fertilizer distribution by helical doser from seed planter. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 31, n. 5, p. 1–7, 2019.

ROZEFELDS, A. Eucalyptus phylogeny and history: a brief summary. **Tasforests-Hobart**, v. 8, n. December, p. 15–26, 1996.

RYU, K. H. et al. Development of Variable Rate Granule Applicator for Environment-Friendly Precision Agriculture (I) - Concept Design of Variable Rate Pneumatic Granule Applicator and Manufacture of Prototype -. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 31, n. 4, p. 305–314, 1 ago. 2006.

SAGRILLO, A. D. et al. Variação da regulação das aletas na aplicação de calcário. **Revista Técnico-Científica**, p. 1–12, 2019.

SAMPAIO, A. N. História. Em: ANDRADE, E. N. (Ed.). **O Eucalipto**. 2. ed. São Paulo: Cia Paulista de Estradas de Ferro, 1961. p. 58–64.

SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Calcário e Dolomito. Em: LUZ, A. B. DA; LINS, F. A. F. (Eds.). **Rochas e Minerais Industriais**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. p. 327–350.

SANAEIFAR, A.; SHEIKHDAVOODI, M. J. Evaluating of broadcasting uniformity of centrifugal and oscillating granular broadcasters. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 4, n. 15, p. 2460–2648, 2012.

SENAR. **Mecanização: aplicação de corretivos e fertilizantes com distribuidor centrífugo autopropelido**. Brasília: Serviço Nacional de Aprendizagem Rural, 2020.

SHI, Y. et al. Fertilization strategy and application model using a centrifugal variable-rate fertilizer spreader. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 6, p. 41–48, 8 dez. 2018.

SHIMIZU, G. D.; MARUBAYASHI, R. Y. P.; GONCALVES, L. S. A. **AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences**. R package version 1.3.2, , 2022.

SHUFA, C.; SHIPING, Z.; XINGZHAO, S. Design and experiment of self-propelled high-ground-clearance spreader for paddy variable-rate fertilization. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, p. 16–21, 2012.

SIKSTRÖM, U. Effects of low-dose liming and nitrogen fertilization on stemwood growth and needle properties of *Picea abies* and *Pinus sylvestris*. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 261–274, 1997.

SILVA, M. A. DA et al. Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 160–172, 2014.

SILVEIRA, W. M. et al. **Influência da velocidade do vento em diferentes horários durante a aplicação de calcário de um distribuidor de corretivos centrífugo**. XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...**Maceió: SBEA, 2017.

SINGH, S. et al. Toxicity of aluminium on various levels of plant cells and organism: A review. **Environmental and Experimental Botany**, v. 137, p. 177–193, 2017.

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. **Soil Survey Manual**. Washington, EUA: USDA Handbook 18, 2017.

SOUZA, H. N. **O estado da arte da mecanização da silvicultura em terrenos montanhosos**. Trabalho final de curso (Especialização em Gestão Florestal)—Curitiba/PR: Universidade Federal de Curitiba, 2014.

SOUZA, S. P. **Tombamento lateral de tratores agrícolas: avaliação do uso de um clinômetro para sua prevenção**. Dissertação (Mestrado em Agronomia)—Piracicaba: ESALQ/USP, 2001.

SPAGNOLO, R. T. et al. Models for predicting the performance of fertilizer metering in seed cum fertilizer drill. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 1, p. 51–57, 2021.

SPEKKEN, M. et al. **Adulção 3.1**. PiracicabaLAP - ESALQ/USP, , 2015.

SRIVASTAVA, A. K. et al. **Engineering Principles of Agricultural Machines**. 2. ed. St. Joseph: ASABE, 2006.

SVENSSON, J. E. T. Effects of constructional and operational variables on the mean mass flow of particulate fertilizer using a studded roller feeder. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 59, n. 4, p. 221–230, 1994.

SYMONDS, W. L.; CAMPBELL, L. C.; CLEMENS, J. Response of ornamental Eucalyptus from acidic and alkaline habitats to potting medium pH. **Scientia Horticulturae**, v. 88, n. 2, p. 121–131, 2001.

THAPER, R. K. **Effect of vane shape and fertilizer product on spread uniformity using a dual-disc spinner spreader**. Dissertação (Mestrado em Ciências)—Auburn, EUA: Auburn University, 2014.

TILMAN, D. et al. Agricultural sustainability and intensive production practices. **Nature**, v. 418, n. 6898, p. 671–677, 2002.

TRIOSCHI, F. Oportunidades, impactos e desafios em segurança e saúde ocupacional diante das perspectivas de crescimento do setor de celulose e papel e da possibilidade de escassez de mão de obra no Brasil. **Revista O Papel**, v. 73, n. 5, p. 65–69, 2012.

VÄÄTÄINEN, K. et al. The costs and profitability of using granulated wood ash as a forest fertilizer in drained peatland forests. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 8, p. 3335–3341, 1 ago. 2011.

VALDEZ, E. Determinacion y estudio de los perfiles de distribucion de superfosfato, hiperfosfato y urea granulados, aplicados com la fertilizadora centrifuga. **Agrinter**, v. 14, n. 4, p. 1–42, 1978.

VAN LIEDEKERKE, P. et al. Recent results of experimentation and DEM modeling of centrifugal fertilizer spreading. **Granular Matter**, v. 10, n. 4, p. 247–255, 9 jun. 2008.

VAN LIEDEKERKE, P. et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader. **Powder Technology**, v. 190, n. 3, p. 348–360, 2009.

VARGAS, J. P. R. et al. Application forms and types of soil acidity corrective: Changes in depth chemical attributes in long term period experiment. **Soil and Tillage Research**, v. 185, p. 47–60, 1 jan. 2019.

VENABLES, W. N.; RIPLEY, B. D. **Modern Applied Statistics with S**. New York, USA Springer, , 2002.

VERLENGIA, F.; GARGANTINI, H. Estudo sobre a eficiência de diferentes frações granulométricas de calcário no solo. **Bragantia**, v. 31, p. 119–128, 1972.

VESTERINEN, P. **Wood ash recycling - State of art in Finland and Sweden**. Jyväskylä, Finlândia: VTT Processes, 31 out. 2003.

VILLETTE, S.; PIRON, E.; MICLET, D. Hybrid centrifugal spreading model to study the fertiliser spatial distribution and its assessment using the transverse coefficient of variation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 137, p. 115–129, 2017.

WEETMAN, G. F.; WEBBER, B. The influence of wood harvesting on the nutrient status of two spruce stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 2, n. 3, p. 351–369, 1972.

WEIRICH NETO, P. H. et al. Correção da acidez do solo em função de modos de incorporação de calcário. **Ciência Rural**, v. 30, n. 2, p. 257–261, abr. 2000.

WEIRICH NETO, P. H. et al. Positioning of fertilizer in corn sowing. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 6, p. 1172–1179, 2013.

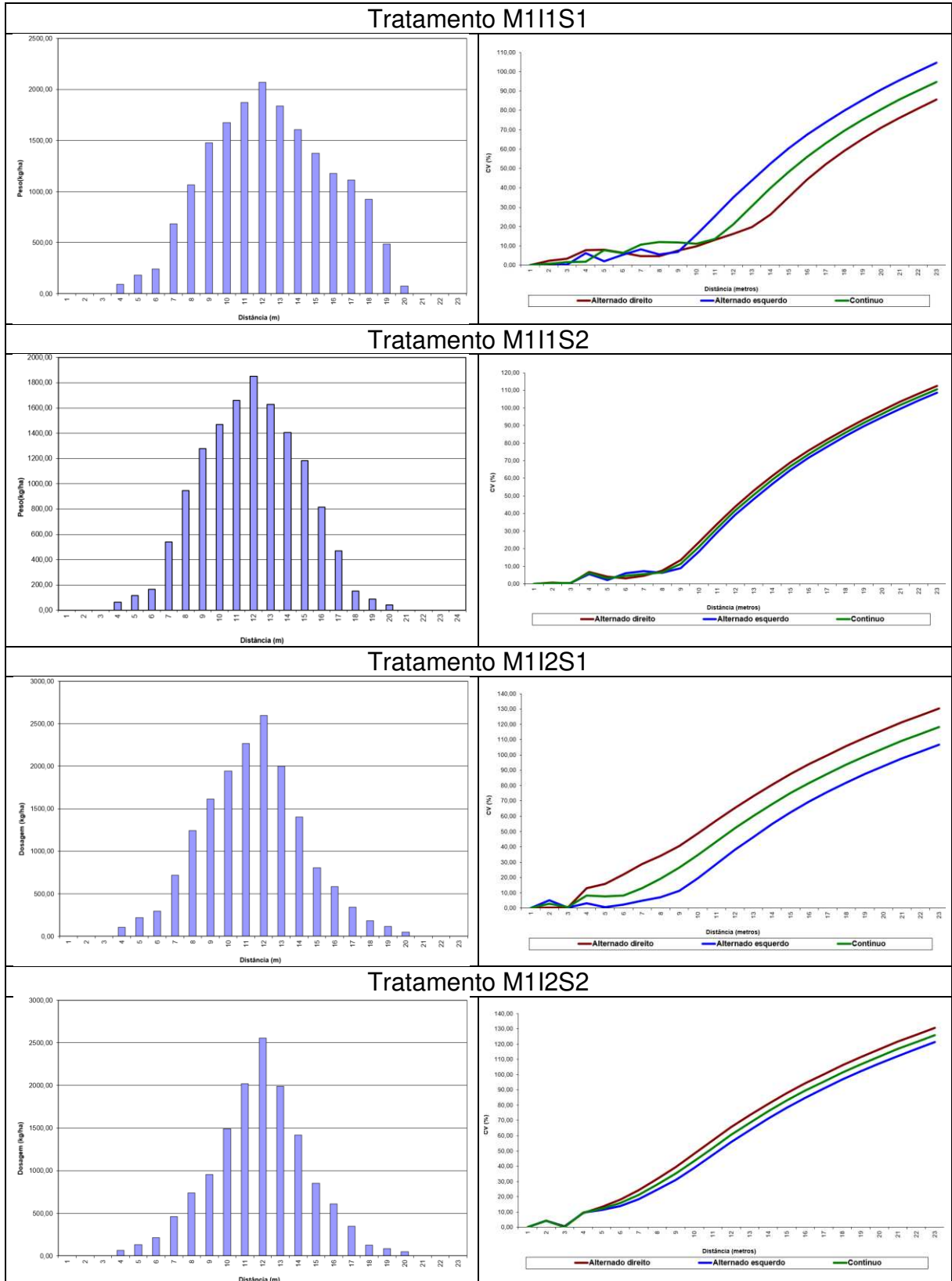
WEISS, A. **Desenvolvimento de um distribuidor helicoidal para calcário seco**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)—Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1986.

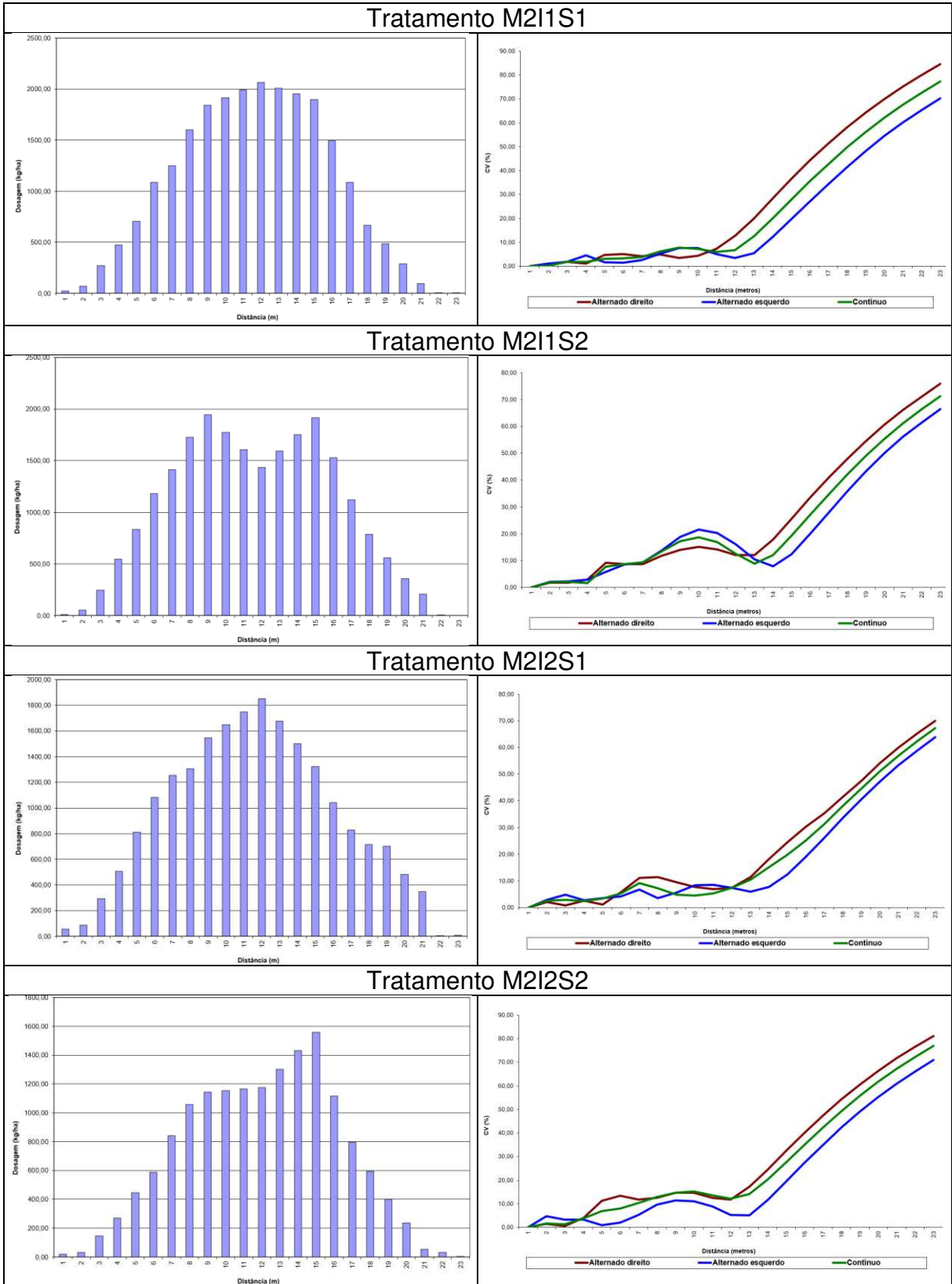
WERNER, V. et al. Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 658–663, 2007.

- WICHERT, M. C. P. et al. Site preparation, initial growth and soil erosion in *Eucalyptus grandis* plantations on steep terrain. **Scientia Forestalis**, v. 46, n. 117, p. 1–13, 2018.
- WICKHAM, H.; BRYAN, J. **readxl: Read Excel Files**. R package version 1.4.2, , 2023.
- WILTSHIRE, R. J. E. Tropical ecosystems | Eucalypts. Em: JEFFERY BURLEY (Ed.). **Encyclopedia of Forest Sciences**. Oxford, EUA: Academic Press, 2004. p. 1687–1699.
- YANG, L. et al. Test and analysis of uniformity of centrifugal disc spreading. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, v. 50, p. 108–114, 18 jul. 2019.
- YILDIRIM, Y. Effect of side to side spreader angle on pattern uniformity in single and twin-disc rotary fertilizer spreaders. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 24, n. 2, p. 173–179, 2008.
- YILDIRIM, Y.; KARA, M. Effect of different vane combinations on fertilizer distribution uniformity with various flow rates in spinning disc broadcasters. **Journal of Agricultural Sciences**, v. 18, p. 54–62, 2012.
- YINYAN, S. et al. Motion analysis and system response of fertilizer feed apparatus for paddy Variable-Rate fertilizer spreader. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 153, n. August, p. 239–247, 2018.
- YULE, I. J. **The effect of fertilizer particle size on spread distribution**. Palmerston North, New Zealand: Massey University, 2011.
- YULE, I. J.; GRAFTON, M. C. E. **A review of spreading accuracy from twin disc fertiliser spreaders**. New Zealand: Massey University, 2016.
- ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 843–852, 2004.
- ZASADA, Z. A.; TAPPEINER, J. C. Full-tree harvesting system aids forest management. **Minnesota Forest Research Notes**, 1969.
- ZEILEIS, A.; HOTHORN, T. Diagnostic Checking in Regression Relationships. **R News**, v. 2, n. 3, p. 7–10, 2002.
- ZEKRI, M.; OBREZA, T. A. Plant Nutrients for Citrus Trees. **EDIS**, v. 2003, n. 2, p. 1–5, 31 dez. 1969.

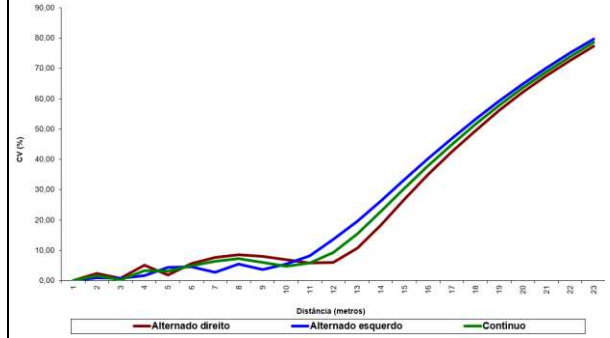
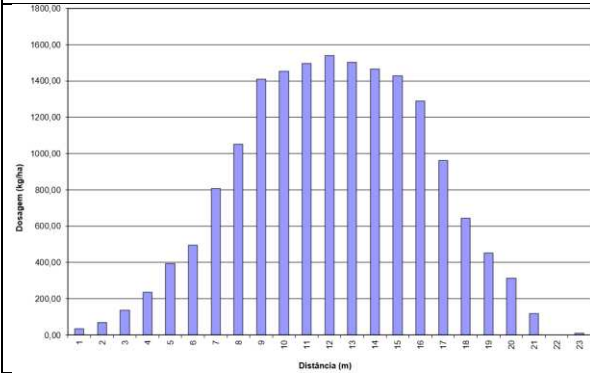
7. APÊNDICE

7.1. Padrão médio de distribuição para cada tratamento

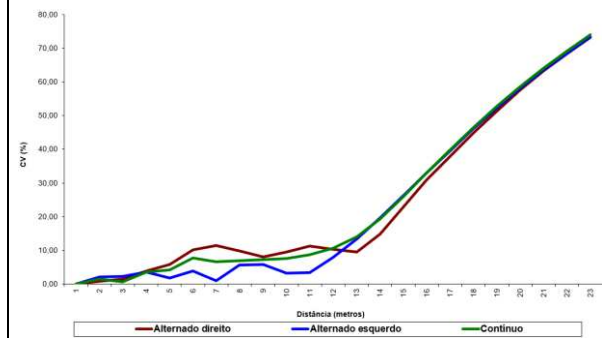
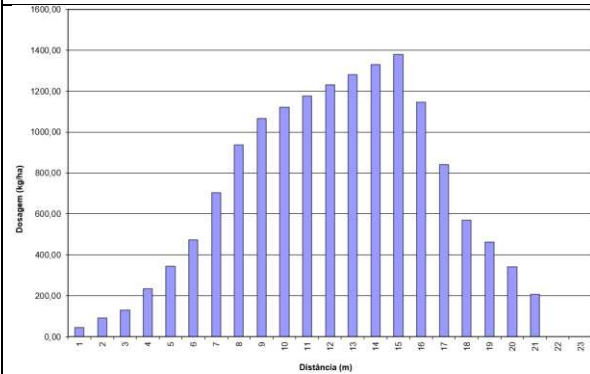




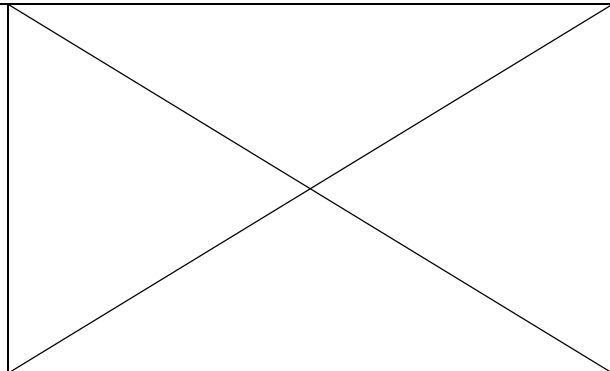
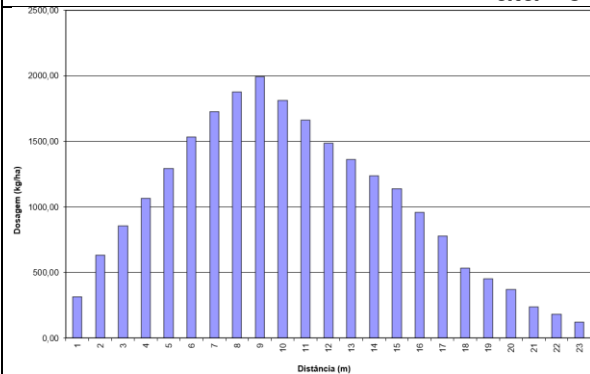
Tratamento M2I3S1



Tratamento M2I3S2



Tratamento M3I1S1



Tratamento M3I1S2

