

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DOSADORES
DE FERTILIZANTES POR DELINEAMENTO
COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Cristian Josue Franck

Santa Maria, RS, Brasil

2014

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DOSADORES DE
FERTILIZANTES POR DELINEAMENTO COMPOSTO
CENTRAL ROTACIONAL**

Cristian Josue Franck

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Prof. Airton dos Santos Alonço (Dr. Eng.)

Santa Maria, RS, Brasil

2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Franck, Cristian Josue

Modelagem matemática para dosadores de fertilizantes por delineamento composto central rotacional / Cristian Josue Franck.-2014.

156 p.; 30cm

Orientador: Airton dos Santos Alonço

Coorientadores: Catize Brandelero, Reges Durigon

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2014

1. Modelagem matemática 2. Aplicação de fertilizantes
3. Agricultura de precisão 4. Máquinas e mecanização agrícola
5. Inclinações longitudinais e transversais de operação
I. Alonço, Airton dos Santos II. Brandelero, Catize
III. Durigon, Reges IV. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

**A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado**

**MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DOSADORES DE
FERTILIZANTES POR DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL
ROTACIONAL**

elaborada por
Cristian Josue Franck

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Agrícola

COMISSÃO EXAMINADORA:

Airton dos Santos Alonço, Dr. Eng.
(Presidente/Orientador)

Paula Machado dos Santos, Dr^a. (IF Farroupilha)

Íria Brucker Roggia, Dr^a. (UFSM)

Santa Maria, 07 de Fevereiro de 2014.

Aos meus pais, Dalva Wouters Franck e Ivo Nelson Franck, por todos os ensinamentos e apoio incondicional durante toda a minha vida, por vezes permitindo à mim realizar sonhos que não puderam concretizar, com todo meu amor e carinho dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao longo de minha jornada acadêmica, muitas pessoas e instituições foram marcantes e importantes para meu crescimento pessoal e profissional, agradeço em especial:

A Deus pela vida.

A Universidade Federal de Santa Maria e as pessoas que a compõe, sendo esta uma importante instituição para o desenvolvimento e transmissão de conhecimento.

Ao Prof. Airton dos Santos Alonço, meu orientador, pelos ensinamentos, compreensão, paciência e por ser um grande amigo, que espero cultivar pelo resto da vida.

Ao Prof. Orlando Pereira-Ramirez, ex-Tutor do grupo PET-Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Pelotas, que sem medir esforços coordenava o grupo repassando importantes ensinamentos, acadêmicos, profissionais e pessoais, que me serão extremamente úteis durante toda a vida.

A minha família, meus pais, minhas irmãs Aline e Diovana, e meus sobrinhos Cinthia e Vinícios por todo apoio, motivação e compreensão durante os momentos de ausência.

Aos colegas do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (LASERG) que auxiliaram na execução das coletas de dados, discussões que contribuíram para o aumento da qualidade deste trabalho e também pelo momentos de amizade, apoio e descontração, Dauto Pivetta Carpes, Mateus Potrich Bellé, Tiago Rodrigo Francetto, Otávio Dias da Costa Machado, Vilnei de Oliveira Dias, Ulisses Benedetti Baumhardt, Fernando Pisseti Rossato, André Augusto Veit, Lucas Barros de Souza, Mariana Weber Rodrigues, Kátia Maria Cardinal, Wagner Pires, Rafael Sobroza Becker, Paulo Roberto Bedin, Lauri Junior Moreira e Gustavo Jose Bonotto.

A Luciana Nunes, secretária do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFSM, pelo auxílio prestado com extrema eficiência e dedicação.

Ao amigo de longa data, colega de graduação, Daniel Padoin Chielle.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa de estudos.

A Stara S.A. Indústria de Máquinas e Implementos Agrícolas.

Aos amigos de apartamento Jorge Rodrigo Massing, Felipe Bianchi, Nelson Knak Neto e Tiago Rodrigo Francetto.

A todos que de alguma forma contribuíram com a realização deste trabalho, muito obrigado!

Inventor é um homem que olha para o mundo em torno de si e não fica satisfeito com as coisas como elas são. Ele quer melhorar tudo o que vê e aperfeiçoar o mundo. É perseguido por uma ideia, possuído pelo espírito da invenção e não descansa enquanto não materializa seus projetos.

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Universidade Federal de Santa Maria

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA DOSADORES DE FERTILIZANTES POR DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

AUTOR: Cristian Josue Franck

ORIENTADOR: Airton dos Santos Alonço

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 07 de fevereiro de 2014.

O crescimento da população mundial lança à agricultura moderna uma série de desafios, um dos principais é a garantia do fornecimento de alimentos. Para isso, é necessária a utilização racional e adequada de fertilizantes, que podem propiciar o aumento da produtividade. Neste sentido, uma tecnologia que pode ser empregada é a Agricultura de Precisão, através da aplicação a taxas variáveis. Para tal, são utilizados controladores eletrônicos, baseados em algoritmos. Porém, é provável que tais algoritmos não considerem o efeito de inclinações longitudinais e transversais sobre a taxa de aplicação de fertilizantes. Com o intuito de aprimorar tais algoritmos, o presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de prever a taxa de aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais e transversais e velocidade de acionamento, através do delineamento composto central rotacional, que possam ser empregados como ferramenta para correção da taxa de aplicação de fertilizantes em agricultura de precisão. Os experimentos foram realizados no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (Laserg), vinculado a Universidade Federal de Santa Maria. Foram utilizados cinco tipos de dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras e três tipos de fertilizantes. Através do delineamento composto central rotacional foram gerados modelos matemáticos para cada tipo de dosador e fertilizante, totalizando quinze modelos. Com a análise de regressão, foi comprovada a eficiência dos modelos e foram realizadas simulações para determinação das taxas de aplicação máxima e mínima e os melhores parâmetros recomendados à operação para cada dosador e tipo de fertilizante. Para determinação dos melhores parâmetros, os modelos foram ajustados em função da velocidade de deslocamento e espaçamento entre linhas. Em seguida foram determinadas as velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para inclinações longitudinais e transversais iguais a zero. A velocidade de acionamento foi mantida fixa e variou-se as inclinações longitudinais e transversais até valores em que a taxa de aplicação atingiu variação de 5%. Foram desenvolvidos gráficos com os intervalos de inclinações longitudinais e transversais a partir dos valores que ocasionaram as variações máximas permitidas de 5% e, através da análise da área gráfica, os dosadores foram classificados quanto ao seu desempenho, sendo considerados mais eficientes aqueles com maior área do gráfico. Foi comprovada a eficiência dos modelos matemáticos gerados a partir do delineamento composto central rotacional, pois seus coeficientes de determinação, foram elevados e seus erros relativos e absolutos baixos. A classificação dos dosadores quanto ao melhor desempenho na alteração da taxa de aplicação de fertilizante foi: helicoidal com descarga por transbordo transversal, helicoidal com descarga por transbordo lateral, helicoidal com descarga por gravidade, rotor acanalado e rotor dentado.

Palavras-chave: Mecanização Agrícola. Agricultura de Precisão. Taxas variáveis.

ABSTRACT

**Master of Science Dissertation
Graduate Program in Agricultural Engineering
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil**

MATHEMATICAL MODELING OF FERTILIZER METERING MECHANISM BY CENTRAL COMPOSITE ROTACIONAL DESIGN

**AUTHOR: CRISTIAN JOSUE FRANCK
ADVISER: AIRTON DOS SANTOS ALONÇO
Santa Maria, February 7nd, 2013.**

The world population growth poses to modern agriculture a number of challenges, one of the main ones is the assurance of the food supply. For this, the rational and appropriate use of fertilizers that can provide increased productivity is required. Accordingly, a technology that can be used is Precision Agriculture, by applying to variable rates. To this end, electronic controllers, based on algorithms are used. However, these algorithms probably do not consider the effect of longitudinal and transverse inclination on the rate of fertilizer application. Aiming to enhance such algorithms, the present study aimed to develop mathematical models capable of predicting the rate of fertilizer application on the basis of longitudinal and transverse gradients and drive speed by of a central composite rotational design, which can be used as a tool to fix the rate of fertilizer application in precision agriculture. The experiments were performed at the Laboratory for Research and Development of Agricultural Machinery (Laserg), linked to the Federal University of Santa Maria. Five types of fertilizer metering mechanism of seed and fertilizer drills in lines and three types of fertilizers were used. Through central composite rotational design mathematical models were generated for each type of fertilizer metering mechanism and fertilizer, totaling fifteen models. With regression analysis, it was proven the efficiency of the models, simulations were performed to determine the minimum and maximum rates and the recommended operation parameters for each fertilizer metering mechanism and type of fertilizer. To determine the best parameters, the models were adjusted for the rate of speed and spacing. Then, the corresponding drive speeds to application rates of 200, 300, 400 and 500 kg ha⁻¹ for longitudinal and transverse inclination zero were determined. The drive speed was fixed and longitudinal and transverse inclination was varied until values on which the application rate reached 5% variation. Graphs with intervals of longitudinal and transverse inclination from the values that caused the maximum permitted variations of 5% were developed, and by analyzing the graph area, the fertilizer metering mechanism were classified according to their performance and are considered more efficient ones with larger area. The efficiency of mathematical models generated from the central composite rotational design was proven, since their coefficients of determination, R², were high and their relative and absolute errors low. The classification of the fertilizer metering mechanism as the best performance on the change in the rate of fertilizer application was: auger-type transverse discharge with overflow, auger-type with overflow and discharge to the side, auger-type with discharge by gravity, fluted cylinder and star wheel.

Keywords: Agricultural Mechanization. Precision Agriculture. Variable rates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes necessários para aplicação à taxa variável em semeadoras-adubadoras. Fonte: Rossato et al. (2012).....	34
Figura 2 - Principais consumidores e produtores mundiais de fertilizantes sólidos minerais percentuais para 2010. Fonte: Adaptado de IFA (2013).....	39
Figura 3 - Evolução do consumo de fertilizantes e da área agrícola entre 1998 e 2009. Fonte: Adaptado de ANDA (2012), FAOSTAT (2012b) e IBGE (2013).	40
Figura 4 - Vazão média de produto em função de inclinações longitudinais para um transportador de eixo helicoidal em três velocidades de acionamento e enchimento de 30%. Fonte: Adaptado de Owen e Cleary (2009).....	43
Figura 5 - Coeficiente de variação médio da taxa de aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais e transversais. Fonte: Adaptado de Bonotto (2012).....	45
Figura 6 - Modelo matemático e estatístico para predição do número de sementes por metro, para dosagem de três populações de soja, por dosador pneumático e velocidade de deslocamento de 6 km h ⁻¹	46
Figura 7 - Simulação de inclinações BANFERTI II. a) Inclinação longitudinal positiva. b) Inclinação longitudinal 0. c) Inclinação longitudinal negativa. d) Inclinação transversal negativa. e) Inclinação transversal 0. f) inclinação transversal positiva.	54
Figura 8 - Bancada para testes com dosadores de fertilizantes, BANFERTI II. 1 – Reservatório de fertilizante, 2 - Mecanismo dosador, 3 - Motor elétrico, 4 - Inversor de frequências.....	58
Figura 9 – Equação linear para determinação da velocidade de acionamento dos dosadores em função da frequência do inversor CFW 10.	58
Figura 10 - Clinômetro digital Pittsburgh Modelo 95998.	59
Figura 11 - Dispositivo utilizado para determinação do ângulo de repouso dos fertilizantes.	61
Figura 12 – Dosador D1. a) Vista lateral. b) Vista superior.....	63
Figura 13 - Dosador D2. a) Vista lateral. b) Vista superior.....	64
Figura 14 - Dosador D3. a) Vista lateral. b) Vista superior.....	65
Figura 15 - Dosador D4. a) Vista lateral. b) Vista superior.....	66
Figura 16 - Dosador D5. a) Vista frontal. b) Vista superior.....	67
Figura 17 - Fluxograma da realização dos experimentos para modelagem matemática de cada dosador e fertilizante.	71

Figura 18 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.	92
Figura 19 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.	95
Figura 20 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.	99
Figura 21 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.	103
Figura 22 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.	108
Figura 23 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.	111
Figura 24 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.	116
Figura 25 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.	119
Figura 26 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.	122
Figura 27 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.	127
Figura 28 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.	130

Figura 29 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6,5km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	133
Figura 30 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	137
Figura 31 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	140
Figura 32 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,50m.....	144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Participação percentual de fertilizantes minerais nos custos de produção de diferentes culturas.....	38
Tabela 2 - Classificação de fertilizantes sólidos minerais segundo ABNT (1994a).	41
Tabela 3 - Tratamentos utilizados e resultados encontrados por Karayel et al. (2004).....	48
Tabela 4 - Valores codificados e absolutos para as três variáveis independentes dos experimentos.....	53
Tabela 5 - Matriz dos tratamentos em DCCR.	55
Tabela 6 - Análise de variâncias.....	56
Tabela 7 - Fertilizantes utilizados nos experimentos.	59
Tabela 8 - Propriedades físicas dos fertilizantes utilizados.....	62
Tabela 9 - Resultado da análise granulométrica dos fertilizantes utilizados.....	62
Tabela 10 – Frequências e rotações de acionamento dos demais dosadores e do dosador 5 em min ⁻¹	67
Tabela 11 – Variação da dose representada pelo limite de 5%.	70
Tabela 12 - Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min ⁻¹ , para o fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	73
Tabela 13 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	74
Tabela 14 - Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura granulada 16-16-16 e os cinco dosadores estudados.	76
Tabela 15 - Erros de ajuste, g min ⁻¹ , e erros relativos, %, para o fertilizante mistura granulada 16-16-16 e os cinco dosadores estudados.....	77
Tabela 16 – Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min ⁻¹ , para o fertilizante mistura farelada 00-15-30.	79
Tabela 17 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura farelada 00-15-30.....	80
Tabela 18 – Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura farelada 00-15-30 e os cinco dosadores estudados.	82
Tabela 19 - Erros de ajuste, g min ⁻¹ , e erros relativos, %, para o fertilizante mistura farelada 00-15-30 e os cinco dosadores estudados.....	83

Tabela 20 - Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min^{-1} , para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.	84
Tabela 21 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.	85
Tabela 22 - Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20 e os cinco dosadores estudados.....	86
Tabela 23 – Erros de ajuste, g min^{-1} , e erros relativos, %, para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20 e os cinco dosadores estudados.	87
Tabela 24 - Taxas de aplicação máximas e mínimas para os três fertilizantes e cinco dosadores estudados.....	89
Tabela 25 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , para o dosador D1, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.....	91
Tabela 26 - Intervalo de inclinações longitudinais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	91
Tabela 27 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para o dosador D1, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.	94
Tabela 28 - Intervalo de inclinações longitudinais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura farelada 00-15-30.	94
Tabela 29 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.	97
Tabela 30 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.....	97
Tabela 31 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,8m.....	98
Tabela 32- Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1}	100

Tabela 33 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,8m.....	101
Tabela 34 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	102
Tabela 35 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	102
Tabela 36 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,8m.....	105
Tabela 37 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.	106
Tabela 38 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.	106
Tabela 39 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D2, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	109
Tabela 40 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	110
Tabela 41 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹	112
Tabela 42 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	113
Tabela 43 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	114

Tabela 44 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	114
Tabela 45 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.	117
Tabela 46 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	118
Tabela 47 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	118
Tabela 48 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.	120
Tabela 49 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	121
Tabela 50 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	122
Tabela 51 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹	123
Tabela 52 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	125
Tabela 53 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	125
Tabela 54 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	126

Tabela 55 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D4, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	128
Tabela 56 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 080m.	129
Tabela 57 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D4, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6,5km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	131
Tabela 58 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura de grânulos, velocidade de 6,5km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	132
Tabela 59 – Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹	133
Tabela 60 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	135
Tabela 61 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	135
Tabela 62 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.	136
Tabela 63 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6,5km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.....	138
Tabela 64 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6,5km h ⁻¹ e espaçamento de 0,80m.	139
Tabela 65 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,50m.....	142

Tabela 66 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,50m.....	142
Tabela 67 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,50m.....	143
Tabela 68 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹	144
Tabela 69 – Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação para todos dosadores e fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha ⁻¹	145
Tabela 70 – Áreas médias correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação em função do tipo de fertilizante.	146
Tabela 71 - Áreas médias correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação em função do tipo de dosador.	146
Tabela 72 - Velocidades de acionamento para correção da taxa de aplicação de 400kg ha ⁻¹ , em diferentes inclinações de trabalho, velocidade de 6km h ⁻¹ e espaçamento de 0,45m.....	147
Tabela 73 – Modelos matemáticos para todos dosadores e fertilizantes estudados.....	148

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de precisão
BANFERTI II	Bancada para testes com dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras em linhas
D1	Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal
D2	Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral
D3	Dosador helicoidal com descarga por gravidade
D4	Dosador rotor acanalado
D5	Dosador disco estrela
DCCR	Delineamento composto central rotacional
DGM	Diâmetro geométrico médio
F1	Fertilizante em mistura granulada
F2	Fertilizante em mistura farelada
F3	Fertilizante em mistura de grânulos
IL	Inclinação longitudinal
IT	Inclinação transversal
LASERG	Laboratório de pesquisa e desenvolvimento de máquinas agrícolas
R	Velocidade de acionamento do dosador
R ²	Coefficiente de determinação
UE	Unidade experimental
X ₁	Variável independente, inclinação longitudinal
X ₂	Variável independente, inclinação transversal
X ₃	Variável independente, velocidade de acionamento
Y	Variável dependente, taxa de aplicação de fertilizante

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	31
Hipóteses	36
Objetivos.....	36
Objetivo Geral	36
Objetivos Específicos	37
1 REVISÃO DE LITERATURA	38
1.1 Fertilizantes	38
1.2 Dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras	41
1.3 Modelagem estatística e matemática	46
2 METODOLOGIA	52
2.1 Local	52
2.2 Planejamento experimental	52
2.2.1 Análise de regressão.....	56
2.3 Material	57
2.3.1 Bancada de ensaios	57
2.3.2 Fertilizantes	59
a) Densidade aparente	60
b) Teor de água.....	60
c) Ângulo de repouso	61
d) Granulometria	62
2.3.3 Dosadores de fertilizantes	63
a) Dosador D1	63
b) Dosador D2	64
c) Dosador D3	65
d) Dosador D4	66

e)	Dosador D5.....	66
2.4	Coleta de dados	68
2.5	Simulações	68
2.5.1	Máxima e mínima taxas de aplicação.....	69
2.5.2	Intervalo de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação	69
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
3.1	Modelos matemáticos	72
3.1.1	Fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	72
3.1.2	Fertilizante mistura farelada 00-15-30	78
3.1.3	Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.....	83
3.2	Simulações	88
3.2.1	Taxas de aplicação máxima e mínima.....	88
3.2.2	Intervalo de inclinações recomendadas à operação	90
a)	Dosador 1.....	90
i)	Fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	90
ii)	Fertilizante mistura farelada 00-15-30	93
iii)	Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.....	96
b)	Dosador 2.....	100
i)	Fertilizante mistura granulada 16-16-16.....	100
ii)	Fertilizante mistura farelada 00-15-30	104
iii)	Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.....	109
ii)	Fertilizante mistura farelada 00-15-30	116
iii)	Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.....	120
d)	Dosador 4.....	124
ii)	Fertilizante mistura farelada 00-15-30	128
iii)	Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.....	130
e)	Dosador 5.....	134

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16	134
ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30	137
iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20	141
CONCLUSÕES	150
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
APÊNDICE	158
APÊNDICE A - Reparametrização dos modelos matemáticos codificados	158

INTRODUÇÃO

Estimativas apontam que a população mundial para 2050 será da ordem de 9,3 bilhões de habitantes. Este crescimento irá trazer uma série de desafios à sociedade, entre eles estão segurança, saúde, saneamento básico e fornecimento de alimentos (FAO 2012a). O fornecimento de alimentos, provavelmente pode ser considerado o desafio de maior importância, e, segundo FAO (2009), a demanda por alimentos irá aumentar 70% até 2050. Essa crescente demanda, lança à agricultura o desafio de aumentar a produção, de forma sustentável, socialmente correta e economicamente viável, com pequenas expansões da área cultivada ou até mesmo, sem expansões.

Referindo-se a indústria de fertilizantes dos Estados Unidos da América, TFI (2011) afirma que esta tem grande responsabilidade em sustentar o crescimento da demanda por alimentos, pois de 40 a 60% do fornecimento de alimentos depende da utilização de fertilizantes. Além disso, o negócio da indústria de fertilizantes, atual e historicamente, é salvar vidas através do melhoramento das condições do solo, elevando o nível nutricional da humanidade e, conseqüentemente, sua saúde.

Por outro lado, Isherwood (1998) afirma que é difícil estimar a relação entre a produção de alimentos e a utilização de fertilizantes minerais, porém caso estes não sejam utilizados, a produtividade das culturas passa a depender exclusivamente das reservas de nutrientes do solo e, é provável que, os sistemas de produção e métodos de manejo tenham de ser alterados. Com isso, possivelmente apenas os países ricos teriam condições de adquirir alimentos, causando impactos sociais e ambientais devidos à redução de empregos e expansão das áreas cultivadas, em locais que atualmente têm-se áreas de preservação ambiental.

Como exemplo disso, Isherwood (1998) relata que na China antiga, a produtividade de arroz, utilizando-se apenas matéria orgânica, foi mantida em 700 kg ha⁻¹ durante muitos anos. Nos últimos cinquenta anos, a partir da utilização de fertilizantes minerais, a produtividade aumentou drasticamente chegando à, aproximadamente, 6000 kg ha⁻¹. O autor estima ainda que, para a França, caso a produtividade de trigo volte a ser a mesma dos anos 1950, 1600 kg ha⁻¹, a população passaria a utilizar 50% de sua renda para adquirir alimentos contra os atuais 20% gastos.

A produção de alimentos, sem dúvida está relacionada à utilização de fertilizantes minerais. Por outro lado, o crescente consumo e a diminuição das reservas de insumos

utilizados na produção dos mesmos (minérios, petróleo, etc.), tem ocasionado a elevação dos seus preços e conseqüentemente aumentado a sua participação nos custos de produção. Dada a importância dos fertilizantes, é necessário que a sua utilização seja realizada de forma racional, evitando desperdícios e potencializando a produtividade das culturas.

Para melhorar a eficiência da operação de aplicação de fertilizantes, é necessário que sejam desenvolvidas tecnologias a fim de reduzir, ou até mesmo eliminar erros, aplicando a quantidade desejada em cada ponto da lavoura, garantindo assim que se alcance, através da potencialização da produção, a produtividade necessária ao aumento da população mundial com os menores efeitos possíveis ao meio ambiente.

Uma tecnologia que vem sendo utilizada para isso é a agricultura de precisão (AP). Segundo Werner (2007) a AP busca aperfeiçoar a utilização dos recursos de produção, conforme a variabilidade espacial da fertilidade do solo e da produtividade das culturas. Para tanto, são confeccionados mapas georeferenciados da fertilidade do solo e da produtividade das culturas.

No contexto da AP pode ser citada como uma de suas contribuições a utilização da tecnologia de aplicação à taxa variável. A aplicação à taxa variável é uma importante parte da agricultura de precisão responsável pela aplicação de insumos, como sementes e ou fertilizantes, em quantidades apropriadas a cada ponto da lavoura. Esta tecnologia pode ser baseada em dois sistemas, mapas de aplicação georeferenciados ou sensores (Yuan et al. 2010).

Em se tratando da reposição de nutrientes em operação simultânea a semeadura, os componentes responsáveis pela dosagem de fertilizante são os mecanismos dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras. Tais mecanismos podem assumir diversas disposições construtivas, sendo encontradas no mercado brasileiro várias opções. Apesar disso, diversos autores afirmam que, mesmo com os atuais avanços tecnológicos na aplicação de fertilizantes, a distribuição de fertilizantes ainda é errônea (BONOTTO 2012; FERREIRA et al. 2010; GARCIA 2007).

Porém, para viabilizar a aplicação à taxa variável, em se tratando de semeadura e adubação simultâneas, é necessário que a semeadora-adubadora utilizada seja adequada. É necessário um sistema de controle, responsável por definir a posição da máquina, associar esta posição a uma taxa de aplicação, oriunda de um mapa de aplicação ou sensor, e comandar o acionamento dos dosadores de forma a atingir a taxa de aplicação desejada.

A variação das taxas de aplicação, de fertilizantes por exemplo, é realizada através da alteração da velocidade de acionamento dos dosadores. Estas variações são realizadas por

atuadores e a intensidade da variação é comandada por um controlador eletrônico. Os controladores eletrônicos de taxas variáveis são definidos por Umezu (2003) como dispositivos eletrônicos, normalmente microprocessados, que tem a função de variar a taxa de aplicação do equipamento com base em informações obtidas dos sensores e ou de um mapa de aplicação, enviando um controle aos atuadores. A Figura 1 apresenta uma ilustração simplificada dos componentes necessários para a aplicação à taxa variável em semeadoras-adubadoras.

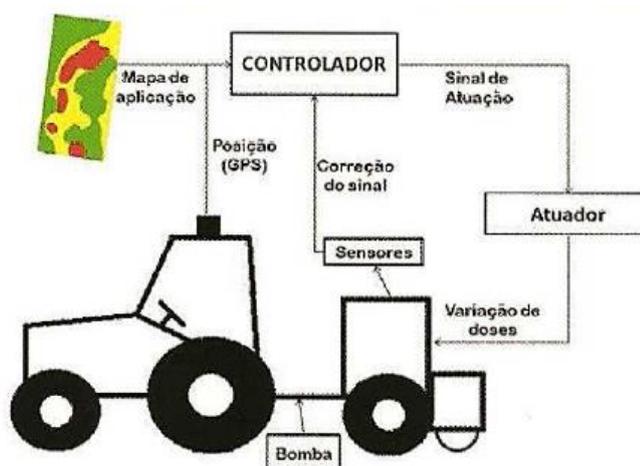


Figura 1 - Componentes necessários para aplicação à taxa variável em semeadoras-adubadoras. Fonte: Rossato et al. (2012).

Para adequação da taxa de aplicação de fertilizantes, o controlador executa uma rotina de cálculos baseada em algoritmos. Algoritmos, segundo Lopes (2010, p. 1) “são uma sequencia finita e ordenada de passos (regras), com um esquema de processamento que permite a realização de uma tarefa (resolução de problemas, cálculos, etc.)”. No entanto, os algoritmos atualmente utilizados por controladores, provavelmente não consideram o efeito de inclinações longitudinais e transversais de trabalho e estas, segundo Bonotto (2012) e Ferreira et al. (2010), alteram a taxa de aplicação de fertilizantes, consequentemente gerando erros.

Com intuito de sanar esta deficiência é necessário o estabelecimento de novas rotinas de cálculo que considerem os efeitos das inclinações. Para tanto é preciso desenvolver equações capazes de prever estes efeitos e inseri-los na rotina dos controladores. Garcia (2007) afirma que a modelagem matemática é uma potente ferramenta para auxílio no projeto

de sistemas controle para aplicação a taxas variáveis. Também Olieslagers et al. (1996) afirmam que para o desenvolvimento destes sistemas de controle, é necessário desenvolver modelos matemáticos que considerem características relativas ao fertilizante, bem como as disposições construtivas e operacionais dos dosadores utilizados.

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma ferramenta capaz de expressar matematicamente a taxa de aplicação de fertilizantes em função do tipo de dosador, fertilizante, inclinação longitudinal de trabalho e inclinação transversal de trabalho que possa ser utilizada como recurso para o desenvolvimento de sistemas eletrônicos de controle da taxa de aplicação de fertilizantes em semeadoras-adubadoras.

Hipóteses

Se é possível, através do delineamento composto central rotacional, gerar equações polinomiais capazes de prever os efeitos lineares e não lineares, de inclinações transversais, inclinações longitudinais, velocidades de acionamento e interações entre estas variáveis, sobre a taxa de aplicação de fertilizantes, então é possível determinar os melhores parâmetros de operação quanto a variação da taxa de aplicação em função destas.

Se o erro da taxa de aplicação ocasionado pelo efeito de inclinações longitudinais e transversais representa 10%, para mais ou para menos, da taxa de aplicação desejada, então para que as equações de predição possam ser utilizadas como ferramenta para desenvolvimento de um dispositivo de controle eletrônico da taxa de aplicação de fertilizantes minerais, tais equações irão apresentar erro relativo médio inferior a 10% e coeficiente de determinação superior a 0,9.

Objetivos

Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta capaz de expressar matematicamente a taxa de aplicação de fertilizantes em função do tipo de mecanismo dosador, fertilizante, inclinações longitudinais e transversais de trabalho, velocidades de acionamento e interações entre inclinações e velocidades, permitindo que tais equações sejam utilizadas como recurso para desenvolvimento de um sistema de controle eletrônico da taxa de aplicação de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em agricultura de precisão, e de fornecer informações para a escolha de mecanismos dosadores que melhor se adaptem as condições de operação as quais serão submetidos.

Objetivos Específicos

- i) Determinar se existe interação significativa entre inclinações longitudinais e transversais na taxa de aplicação de fertilizantes;
- ii) Determinar as inclinações longitudinais, quando estas forem significativas, nas quais ocorra maior e menor variação da taxa de aplicação;
- iii) Determinar as inclinações transversais, quando estas forem significativas, nas quais ocorra maior e menor variação da taxa de aplicação;
- iv) Determinar os limites indicados para utilização de cada tipo de dosador e fertilizante sem que sejam ocasionados erros elevados.

1 REVISÃO DE LITERATURA

1.1 Fertilizantes

A capacidade do solo de fornecer nutrientes varia de solo para solo bem como em função da ocorrência de fatores atmosféricos, como erosão e lixiviação, e ainda em função do tempo de utilização, pois, a colheita de uma cultura, além de exportar nutrientes, interrompe o ciclo natural que faria com que os nutrientes retornassem ao solo (TROEH; THOMPSON, 2007).

Apesar de praticamente todos os elementos químicos conhecidos já terem sido encontrados em tecidos vegetais, apenas dezessete elementos são considerados como sendo essenciais para o crescimento da planta. Destes, o carbono, hidrogênio e oxigênio são supridos pela água e pelo ar. Os catorze elementos restantes podem ser agrupados em seis macronutrientes, necessários em grande quantidade para as plantas, e oito micronutrientes, necessários apenas em pequenas quantidades (PERES, 2004; TROEH; THOMPSON, 2007).

Com a necessidade de reposição de nutrientes, através da aplicação de fertilizantes, surge uma parte do custo de produção referente a sua aquisição. Quanto a necessidade de reposição de nutrientes, Garcia (2007) cita que a uniformidade de distribuição, bem como a deposição adequada de fertilizantes no solo, são importantes para que se obtenha a máxima resposta dos cultivos com o menor custo possível. A Tabela 1 apresenta o percentual de participação nos custos de produção representado pelos fertilizantes para diferentes culturas.

Tabela 1 - Participação percentual de fertilizantes minerais nos custos de produção de diferentes culturas.

AUTOR	SAFRA	CULTURA	PERCENTUAL
DE MORI, 2007	2007	TRIGO	23,03
IMEA, 2012a	2012/13*	MILHO	26,95
IMEA, 2012b	2012/13*	SOJA	29,05
IMEA, 2012c	2012/13*	ALGODÃO	24,83
IRGA, 2011	2010/11	ARROZ	11,37

*Estimativas baseadas em preços praticados em junho de 2012.

É possível observar na Tabela 1 que as culturas de soja e milho, de grande importância para o agronegócio brasileiro, são as que possuem maior participação dos fertilizantes em seu custo de produção. Com isso também pode-se atribuir que essas culturas tem grande dependência da utilização de fertilizantes para que seja garantida a produção necessária para o consumo humano e animal, no Brasil e no mundo.

O consumo mundial de fertilizantes sólidos minerais, no ano de 2010, foi da ordem de 172,85 milhões de toneladas, sendo o Brasil o 4º maior consumidor. No mesmo ano, o Brasil foi o 11º produtor de fertilizantes. Os maiores consumidores e produtores de fertilizantes são China, Índia e Estados Unidos, como mostra a Figura 2, em valores percentuais (IFA, 2013).

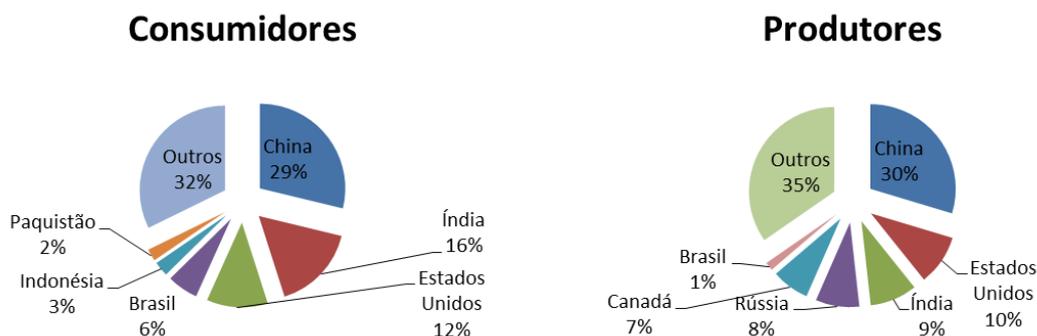


Figura 2 - Principais consumidores e produtores mundiais de fertilizantes sólidos minerais percentuais para 2010. Fonte: Adaptado de IFA (2013).

No Brasil, o consumo de fertilizantes, no período de 1998 a 2011, aumentou 93,12% atingindo 28,33 milhões de toneladas (ANDA, 2012). Neste mesmo período, a área agrícola aumentou 1,69% chegando a 264,5 milhões de hectares (FAOSTAT, 2012b). Ainda IBGE (2013) afirma que, para o período de 1998 a 2009, a produção de cereais, leguminosas e oleaginosas aumentou cerca de 78,6%. Com base nisso, é possível atribuir que, o consumo de fertilizantes, entre outros fatores, propiciou o aumento da produção, demonstrando assim a importância da sua utilização para a evolução da produtividade agrícola brasileira, como apresenta a Figura 3.

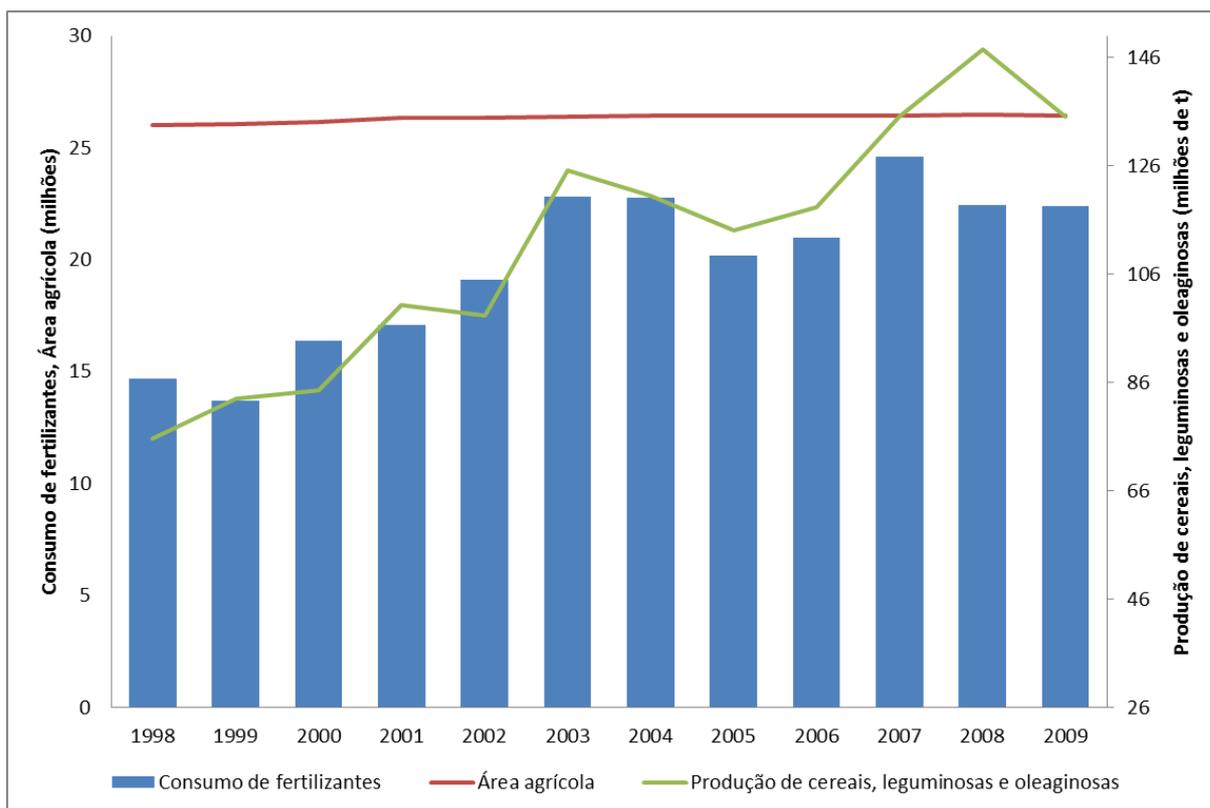


Figura 3 - Evolução do consumo de fertilizantes e da área agrícola entre 1998 e 2009. Fonte: Adaptado de ANDA (2012), FAOSTAT (2012b) e IBGE (2013).

De acordo com Alcarde et al. (1998) os fertilizantes sólidos são divididos em duas classes. Pó ou farelado, quando as partículas são de pequenas dimensões, e granulado, quando as partículas são de dimensões que permitem caracterizar um grânulo. Ainda, os fertilizantes sólidos granulados se subdividem em dois tipos:

Mistura de grânulos ou misturas de granulados: são as obtidas pela simples mistura de dois ou mais fertilizantes simples previamente granulados. Na mistura de grânulos, os nutrientes estão contidos em grânulos diferentes.

Misturas granuladas: são as obtidas pela mistura de dois ou mais fertilizantes simples em pó e sua posterior granulação. Estes fertilizantes têm todos os nutrientes de sua fórmula contidos em cada grânulo (ALCARDE et al. 1998 p.10).

Já ABNT (1994a) define os fertilizantes sólidos minerais farelados, granulados e em mistura de grânulos de acordo com a sua granulometria, conforme a Tabela 2. Granulometria, segundo Zanotto et al. (1999) é definida como um método de análise que visa classificar as partículas de uma determinada amostra de acordo com o Diâmetro Geométrico Médio (DGM).

Tabela 2 - Classificação de fertilizantes sólidos minerais segundo ABNT (1994a).

Peneira ABNT nº	mm	Fert. farelado	Fert. granulado	Fert. mistura de grânulos
		Percentual retido acumulado		
5	4,00	Máximo 5%	Máximo 5%	Máximo 5%
10	2,00	Máximo 50%	-	-
18	1,00	-	Mínimo 70%	Mínimo 70%
35	0,50	Máximo 50%	Mínimo 95%	Mínimo 90%

Fonte: ABNT (1994b).

Além do tipo de fertilizante é preciso determinar suas propriedades físicas. Algumas destas são granulometria, umidade, ângulo de repouso, densidade, etc.. O ângulo de repouso é definido por Silva et al. (2006) como o ângulo formado pela superfície livre e o plano horizontal, formado pelos grânulos menos instáveis e não confinados, próximos ou na superfície. O ângulo de atrito interno, que interfere no fluxo do produto, difere-se do ângulo de repouso apenas pelas pressões exercidas sobre o produto, e quando o produto encontra-se em condições com pressões de confinamento praticamente nulas, condição observada nos reservatórios de semeadoras-adubadoras, os dois ângulos podem ser considerados iguais.

As propriedades físicas afetam a aplicação e conseqüentemente os cultivos sendo as propriedades que apresentam maiores efeitos a granulometria, densidade, ângulo de repouso e umidade (BONOTTO, 2012; FERREIRA et al. 2010; GARCIA, 2007). Para que o consumo de fertilizantes seja racional e eficiente, além das propriedades físicas, também é preciso conhecer as propriedades mecânicas bem como as condições de armazenamento e detalhes da operação dos mecanismos dosadores. Tais cuidados são importantes pois, os fertilizantes possibilitam incrementos na produtividade além de, caso sejam utilizados de maneira incorreta, causar impactos ambientais (CAMACHO-TAMAYO et al. 2009).

1.2 Dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras

Em se tratando de aplicação de fertilizantes em semeadoras-adubadoras o dosador de fertilizante tem a função de transferir fertilizante do reservatório para o componente de deposição, segundo uma dose preestabelecida (ABNT, 1996).

Os mecanismos dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras podem ser divididos basicamente nos seguintes modelos: eixo helicoidal, rotor dentado, disco horizontal giratório, rotor acanalado, sistema de correias ou correntes e rotor vertical impulsador (BALASTREIRE, 1987; BONOTTO, 2012; FRANCETTO et al., 2012; GARCIA, 2007; LEINDECKER, 2011; SILVA, 2003;).

Apesar dos diversos dosadores disponíveis no mercado brasileiro, ocorreu um aumento da representatividade dos dosadores do tipo eixo helicoidal. Em 2003 estes representavam 65,1% dos mecanismos dosadores presentes nas semeadoras-adubadoras (SILVA, 2003), em 2011 a sua participação passou para 89,38% (LEINDECKER et al., 2011) e em 2012 chegou a 94,44% (FRANCETTO et al., 2012).

O aumento da utilização dos dosadores de eixo helicoidal provavelmente se deu devido à eficiência e praticidade deste mecanismo. Segundo Agromac (2012), fabricante de um modelo de dosador do tipo eixo helicoidal, seu dosador é compatível com a maior parte das semeadoras-adubadoras do mercado, podendo ser utilizado na implantação de culturas como milho, soja, arroz, trigo, algodão, entre outras, aplicando fertilizantes granulados e em pó, com fácil manutenção já que a abertura do dosador e substituição do eixo helicoidal pode ser feita sem utilização de ferramentas.

Como fazem uso do mesmo princípio de solução para o transporte de materiais (eixos helicoidais), é pertinente fazer uma analogia entre os dosadores de fertilizantes do tipo eixo helicoidal e transportadores popularmente conhecidos como roscas transportadoras. Shimizu e Cundall (2001) citam que os mecanismos transportadores de eixos helicoidais, roscas transportadoras, são utilizados pela humanidade para manipulação de produtos a granel desde tempos históricos e que apresentam como principais vantagens o seu *design* compacto, pouca manutenção e capacidade de transportar materiais continuamente e de forma segura. Suas desvantagens são a limitação de comprimento (irrelevante no caso de mecanismos dosadores de fertilizantes) e a incapacidade de transportar materiais de elevada viscosidade e muito irregulares.

Ainda em relação a transportadores do tipo rosca sem fim, Milman (2002) afirma que para o dimensionamento destes, o projetista deve considerar o peso específico do material a ser transportado, passo do helicóide, diâmetro do helicóide, velocidade de acionamento e um coeficiente de enchimento que varia de 0,25 a 0,40 em função do peso específico do material. O autor afirma ainda que caso o transportador for operado de forma inclinada, elevando o material, deve ser considerado um fator de redução do fluxo em função da inclinação longitudinal, que varia de 5 a 70%, para as inclinações de 5° e 30° respectivamente.

De acordo com Garcia (2007) os dosadores de eixo helicoidal costumam apresentar variações na distribuição de fertilizantes. O autor afirma que tais variações são ocasionadas pelo atrito gerado no transporte do fertilizante com a superfície interna do mecanismo dosador gerando um adensamento na superfície do helicóide e conseqüentemente vazios. A fim de aumentar a uniformidade, novos modelos de dosadores de eixo helicoidal foram desenvolvidos. Estes modelos diferem-se em função do tipo de descarga de fertilizante e, basicamente três modelos estão difundidos no mercado, sendo eles: descarga por transbordo transversal, descarga por transbordo lateral e descarga por gravidade.

Os transportadores de eixo helicoidal (rosca sem fim), segundo Owen e Cleary (2009), são amplamente utilizados para o transporte e dosagem de produtos em indústrias de ramos variados, desde produtos minerais, agrícolas, farmacêuticos, químicos, até indústrias de cimento, areia, sal, entre outras, podendo ser utilizados tanto para produtos granulares quanto em pó. Segundo os resultados obtidos em seu trabalho, os autores afirmam que o aumento da inclinação das roscas transportadoras reduz linearmente o fluxo de produto em inclinações de até 60° e que, a partir desta inclinação a redução do fluxo de produto diminui e o fluxo torna-se praticamente constante, conforme a Figura 4. Os autores afirmam ainda que a redução volumétrica do fluxo, comparando-se as inclinações de 0° e 90°, operando a 600, 1000 e 1400rpm é de 47, 31 e 23% respectivamente. Isso demonstra que maiores velocidades de acionamento reduzem o efeito das inclinações sobre a diminuição da vazão.

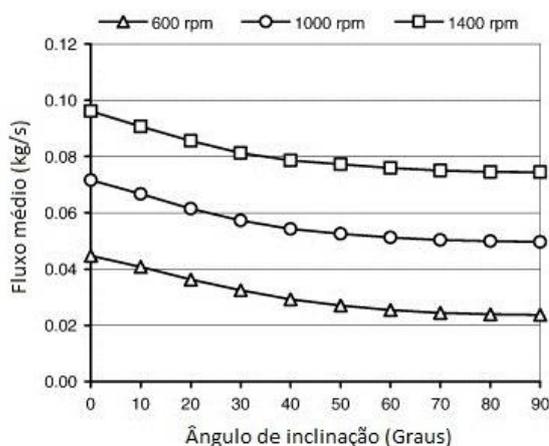


Figura 4 - Vazão média de produto em função de inclinações longitudinais para um transportador de eixo helicoidal em três velocidades de acionamento e enchimento de 30%. Fonte: Adaptado de Owen e Cleary (2009).

Ferreira et al. (2010) ao analisar o desempenho de dois dosadores helicoidais de fertilizantes, com descarga por transbordo transversal e por gravidade, em função de inclinações longitudinais de trabalho de -10, -5, 0, 5 e 10°, com passos de 25,4 e 50,8mm, utilizando fertilizantes do tipo mistura granulada e mistura farelada, operando com velocidades de acionamento de 55 e 73rpm concluíram que a inclinação longitudinal afeta a taxa de aplicação e que, independente do tipo do mecanismo dosador, da velocidade de acionamento e do passo do helicóide, a taxa de aplicação obteve maior percentual de variação na inclinação de 10°. Os autores ainda citam que o mecanismo dosador com descarga por transbordo transversal e passo de 25,4mm obteve a melhor eficiência para os dois tipos de fertilizante e para as duas velocidades de acionamento.

Bonotto et al. (2011) também realizaram experimentos sobre o desempenho de mecanismos dosadores do tipo rotor helicoidal com descarga por transbordo e por gravidade porém utilizando mistura de fertilizantes simples, na proporção de 2:1 de ureia para cloreto de potássio com as mesmas inclinações de trabalho empregadas por Ferreira et al. (2010) e velocidade de 60rpm. Os resultados encontrados concordaram com Ferreira et al. (2010) e, além disso, os autores relatam que dada a amplitude da variação dos resultados em função das inclinações longitudinais empregadas, a diferença na taxa de aplicação, para os dois mecanismos dosadores, pode atingir aproximadamente 10% para mais ou para menos em relação a taxa de aplicação desejada.

Como parte de sua pesquisa Bonotto (2012) avaliou, separadamente, a uniformidade da taxa de aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais e transversais. Quanto a inclinações longitudinais, o autor afirma que houve efeito significativo das inclinações sobre a taxa de aplicação para os cinco mecanismos dosadores avaliados com três tipos de fertilizante, sendo observado que há uma tendência de aumento da taxa de aplicação quando operando em inclinação de 11° e uma redução na taxa de aplicação para a inclinação de -11°. Para o dosador do tipo rotor acanalado, apesar de não apresentar bom desempenho com fertilizante farelado, foi o que obteve o melhor desempenho para os fertilizantes mistura de grânulos e mistura granulada. Os dosadores com rotor helicoidal com descarga por transbordo transversal e lateral apresentaram variações cerca de 10% menores que os demais dosadores em relação a variação ocasionada pelas inclinações longitudinais. Contudo destaca-se que os mecanismos avaliados obtiveram bom desempenho, pois três dos cinco dosadores apresentaram coeficiente de variação inferior a 10%.

Quanto a inclinações transversais, o autor afirma que também ocorreu efeito significativo, porém não foi possível observar tendências no comportamento, pois para cada

vazão, fertilizante e dosador houveram comportamentos diferentes. O coeficiente de variação médio dos mecanismos avaliados para todos os fertilizantes foi inferior a 5% sendo o menor o do dosador do tipo rotor helicoidal com descarga por transbordo transversal. A Figura 5 apresenta os coeficientes de variação médios dos dosadores em função de inclinações longitudinais e transversais.

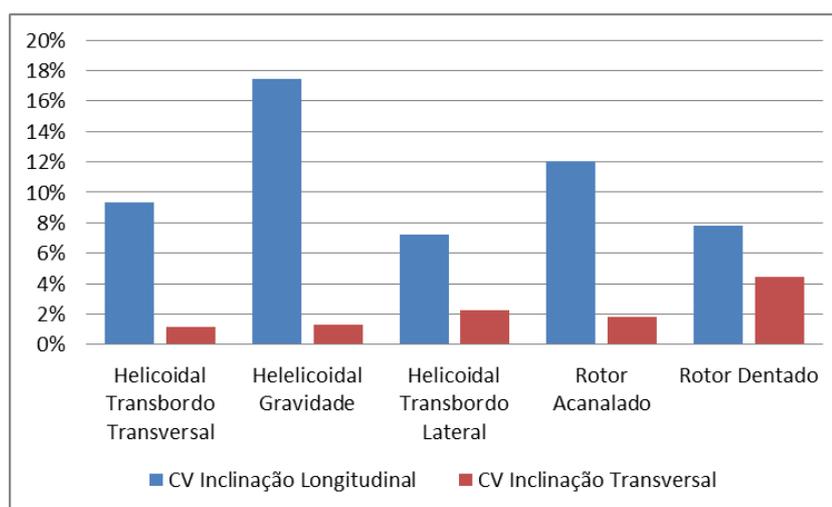


Figura 5 - Coeficiente de variação médio da taxa de aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais e transversais. Fonte: Adaptado de Bonotto (2012).

Fazendo uma análise dos dados apresentados por Bonotto (2012) pode-se concluir que, na média geral dos experimentos, as inclinações longitudinais de -11° e 11° causaram alteração de 9,63% em relação à operação dos dosadores quando nivelados, corroborando com os resultados encontrados por Bonotto et al. (2011). Da mesma forma, para as inclinações transversais observou-se uma alteração média de 1,79% em relação à operação dos dosadores quando nivelados.

1.3 Modelagem estatística e matemática

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda a simulação de sistemas reais a fim de prever o comportamento dos mesmos, sendo empregada em diversos campos de estudo, tais como física, química, biologia, economia e engenharia (PÖRSCH, 2012 p. 20).

Em se tratando de modelagem, Rodrigues e Iemma (2009) citam que existem diferentes conceitos relacionados a modelagem matemática e estatística. Nos casos em que é aplicada uma lei matemática, modelagem matemática definida, por exemplo, pela função linear $y = 3,0 + 2,5x$ sabe-se que a reta correspondente a esta função é formada pelo lugar geométrico de todos os pontos do espaço que satisfaçam tal lei, sem que ocorram erros, pois todos os pontos estão localizados sobre a reta. Já quando se trata da lei estatística, modelagem estatística, tem-se uma nuvem de pontos e busca-se encontrar a função que melhor define a distribuição destes pontos ficando alguns localizados fora da reta ou curva definidos pela função. A Figura 6 demonstra a diferença entre os gráficos das leis matemática e estatística.

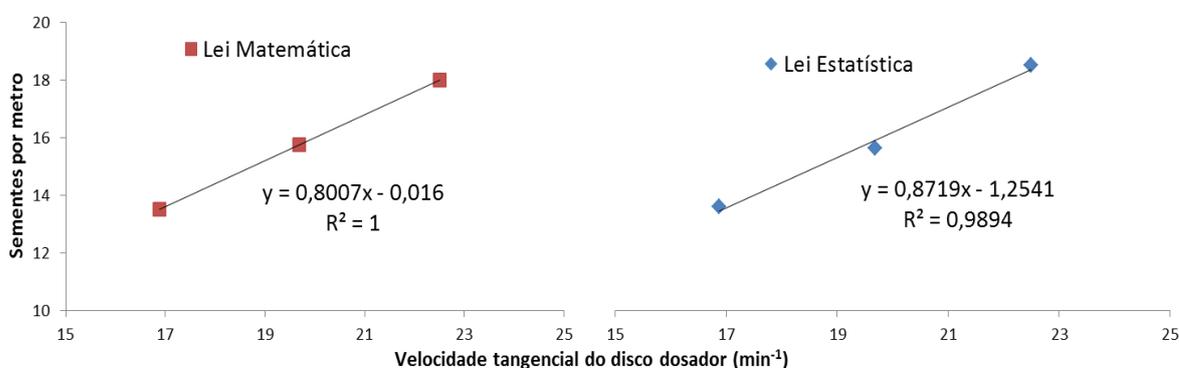


Figura 6 - Modelo matemático e estatístico para predição do número de sementes por metro, para dosagem de três populações de soja, por dosador pneumático e velocidade de deslocamento de 6 km h^{-1} .

Na pesquisa agropecuária, diversos estudos vêm empregando a modelagem matemática para prever o comportamento dos mais variados sistemas. Pörsch (2012) utilizou a modelagem matemática para realizar simulações de inclinações de trabalho de uma bancada acionada pneumáticamente. O objetivo desta bancada foi servir de suporte para experimentos

com componentes de colhedoras de grãos em busca de melhorias de projeto destes componentes.

Com o avanço da agricultura de precisão europeia no final do século vinte, devido a vantagens dos distribuidores de fertilizantes de discos giratórios como elevada largura de trabalho, pequeno tamanho e baixo custo de aquisição, entre outras, muitos agricultores desejavam utilizar este equipamento para aplicação à taxas variadas em agricultura de precisão. Até então os distribuidores eram empregados apenas para aplicações à taxas constantes, sendo então necessárias adaptações para que este equipamento realiza-se tal função, ou seja, desenvolver um sistema de controle (Olieslagers et al., 1996).

Para o desenvolvimento de um sistema de controle a primeira etapa é a modelagem matemática de um distribuidor de fertilizantes de discos giratórios. Para geração dos modelos os autores consideraram diversos parâmetros relacionados ao tipo de fertilizante bem como disposições construtivas do próprio distribuidor. Dentre estes parâmetros podem ser citados o tamanho, formato e posição do orifício de saída do fertilizante, diâmetro e velocidade angular dos discos, tamanho médio das partículas, peso específico e coeficiente de rugosidade dos fertilizantes, dentre outros fatores de influencia.

De acordo com os autores o desenvolvimento de um sistema de controle eficiente para este tipo de equipamento é uma tarefa complexa, pois para que a aplicação de fertilizante seja eficiente devem ser atendidas exigências tais como taxa de aplicação (kg ha^{-1}) de cada porção da lavoura, baixo coeficiente de variação em relação à pontos transversal e longitudinalmente distantes do distribuidor, distribuição simétrica e baixa ocorrência de sobreposição considerando a operação exposta a diferentes condições atmosféricas como ventos, temperatura e umidade, por exemplo. Ou seja, um grande número de variáveis está envolvido e, ocasionalmente torna-se impossível prever os efeitos das mesmas. A exemplo disso, Testezlaf e Matsura (2005) não conseguiram validar um modelo de perda de carga em filtros de areia, pois não foi possível determinar o efeito de todas as variáveis envolvidas, necessitando assim de ampliação de seus estudos.

Anantachar et al. (2010), realizaram estudos comparativos entre modelos estatísticos e de redes neurais, para estimação de parâmetros operacionais e de projeto de semeadoras com mecanismo dosador de sementes do tipo disco inclinado. Em sua pesquisa, foram desenvolvidos modelos matemáticos capazes de prever a densidade de semeadura (sem m^{-2}), espaçamento entre sementes (mm) e percentual de sementes danificadas, para as três cultivares de amendoim mais utilizadas na Índia.

Já Karayel et al. (2004), realizaram modelagem matemática de um mecanismo pneumático dosador de sementes. O principal objetivo do trabalho foi determinar a ótima pressão de trabalho para sementes de milho, soja, algodão, melancia, melão, pepino, beterraba e cebola utilizando discos com diferentes tamanhos de orifícios e diferentes pressões negativas de trabalho. Através de experimentos realizados em delineamento experimental em blocos ao acaso, com cinco repetições, os autores concluíram que as pressões que atingiram o melhor desempenho quanto à distribuição longitudinal de sementes variaram de acordo com a cultura, em consequência das suas propriedades físicas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Tratamentos utilizados e resultados encontrados por Karayel et al. (2004).

Cultura	Orifício (mm)	Pressão estudada (KPa)	Pressão ideal (KPa)
Milho I	3,5	2; 3; 4 e 5	4,0
Milho II	3,5	2; 3; 4 e 5	4,0
Soja	3,5	2; 3; 4 e 5	3,0
Algodão	3,5	2; 3; 4 e 5	3,0
Melancia I	2,5	2; 2,5; 3 e 3,5	3,0
Melancia II	2,5	2; 2,5; 3 e 3,5	2,5
Melão	2,5	2; 2,5; 3 e 3,5	2,5
Pepino	2,5	2; 2,5; 3 e 3,5	2,5
Beterraba	1,5	1; 1,5; 2 e 2,5	2,0
Cebola	1,5	1; 1,5; 2 e 2,5	1,5

Fonte: Adaptado de Karayel et al. (2004).

Com base em seus resultados os autores desenvolveram modelos matemáticos para determinar a pressão ideal em função de propriedades físicas das sementes. As propriedades físicas analisadas pelos autores foram comprimento, largura, espessura, área, esfericidade e massa de mil sementes. Após análise dos modelos gerados, os autores concluíram que o modelo com maior capacidade de prever a pressão ideal foi o modelo em função da massa de mil sementes.

Garcia et al. (2006) realizaram a caracterização de um mecanismo dosador com rotor helicoidal de fertilizantes sólidos determinando a equação da taxa de aplicação em função da rotação de acionamento, Equação 1, obtendo coeficiente de determinação de 0,989. Isto

demonstra que de forma simples, com uma equação linear, e apresentando elevado coeficiente de determinação é possível gerar equações de predição da taxa de aplicação em função da velocidade de acionamento. Contudo, como a geração de equações de predição não era o objetivo principal, os autores não consideraram os efeitos das inclinações de trabalho sobre a taxa de aplicação de fertilizantes sólidos.

$$y = 1,2819x + 0,5781 \quad (1)$$

em que,

y = taxa de aplicação, g s^{-1} ;

x = velocidade de acionamento, rad s^{-1} .

Já Garcia (2007) desenvolveu um sistema de controle eletromecânico para dosadores de fertilizantes. Sistema este que efetua o acionamento dos dosadores baseado na modelagem matemática de um mecanismo dosador em função da densidade do fertilizante utilizado, sinal de *duty cycle* e altura de fertilizante no reservatório. Foram desenvolvidos três modelos: fatorial, central composto linear, e central composto quadrático. O modelo central composto quadrático foi o que apresentou o maior coeficiente de determinação, 96,03%, porem a equação gerada através deste modelo apresentou grande dificuldade de implementação no sistema micro processado, deixando-o lento e com falhas. Devido a isso o modelo escolhido para implementação no sistema foi o central composto linear com coeficiente de determinação de 84,38%. Após avaliação do sistema desenvolvido o autor concluiu que, em testes estáticos o valor do desvio médio relativo ficou entre 0,8 e 11,4% para taxas de aplicação de 50 e 100 kg ha^{-1} respectivamente. Em testes dinâmicos constatou-se que o sistema respondeu de forma adequada as alterações da velocidade corrigindo a taxa de aplicação instantaneamente.

Camacho-Tamayo et al. (2009) realizaram avaliação de cinco mecanismos dosadores utilizando dois tipos de fertilizantes e dois tipos de corretivos. Os autores confeccionaram modelos estatísticos da taxa de aplicação de fertilizantes (g min^{-1}), (Equação 2) em função da rotação de acionamento (rpm), ângulo de repouso (graus), umidade (%) e diâmetro médio de partículas (mm) para cada mecanismo dosador avaliado.

Apesar de inovações que surgiram nos dosadores de fertilizantes helicoidais, como a descarga por transbordo, por exemplo, Garcia (2011) afirma que a redução do coeficiente de variação da taxa de aplicação de fertilizantes ocasionada por estas inovações ainda não resolveu o problema da irregularidade da taxa de aplicação. Desta forma o autor desenvolveu

um sistema para controle capaz de diminuir tais variações. Este sistema fez uso de modelos matemáticos capazes de prever o fluxo de massa de fertilizante instantâneo em função das características construtivas do mecanismo dosador, da posição angular do helicóide em função do ponto de descarga e velocidade angular de acionamento do dosador.

$$y = AV_e + B\rho + Ca_r + DH + E\varphi_m \quad (2)$$

em que,

y = taxa de aplicação, g min^{-1} ;

V_e = velocidade de acionamento, revoluções min^{-1} ;

ρ = densidade, kg m^{-3} ;

a_r = ângulo de repouso, graus;

H = umidade, %;

φ_m = diâmetro médio de partículas, mm;

A, B, C, D e E = fatores adimensionais dependentes das características dos produtos.

As informações até aqui expostas, demonstram que a modelagem estatística e matemática é uma potente ferramenta de auxílio à pesquisa, projeto e utilização de máquinas agrícolas. Foram encontradas, através da modelagem, soluções para diferentes problemas, permitindo o uso da modelagem desde a predição de espaçamentos entre sementes até o projeto e desenvolvimento de sistemas de controle eletrônico da aplicação de fertilizantes.

2 METODOLOGIA

2.1 Local

Os experimentos foram conduzidos nas instalações do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas (LASERG), vinculado à Universidade Federal de Santa Maria, posicionada geograficamente na depressão central do estado do Rio Grande do Sul-Brasil, Santa Maria – RS, cujo centro geográfico corresponde as seguintes coordenadas: Latitude Sul 29°72'05", longitude Oeste -53°70'32" e altitude média de 99m.

2.2 Planejamento experimental

Para cada tipo de fertilizante e mecanismo dosador foi desenvolvido um modelo matemático, sendo que foram utilizados 5 mecanismos dosadores e 3 tipos de fertilizantes. O delineamento experimental utilizado foi o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com três variáveis independentes (X_1 , X_2 e X_3) e uma variável dependente (Y), conforme o planejamento experimental proposto por Rodrigues e Iemma (2009). O delineamento é composto por um fatorial 2^3 + 6 pontos axiais + 5 repetições no ponto central.

O DCCR é uma metodologia que utiliza combinações de valores específicos no universo de solução, podendo assim explorar os efeitos das variáveis com um número menor de Unidades Experimentais (UE). Para tanto, além de combinações específicas, o DCCR utiliza as variáveis de forma codificada a fim de que, dessa forma seja obtido um contraste ortogonal entre os tratamentos, conforme a Tabela 4.

Os tratamentos foram compostos por X_1 , inclinação longitudinal, (-11°, -6,55°, 0°, 6,55° e 11°), X_2 , inclinação transversal, (-11°, -6,55°, 0°, 6,55° e 11°) e X_3 , velocidade de acionamento (25, 45, 75, 105 e 125 rpm). As inclinações longitudinais e transversais -11°, 0° e 11° foram definidas de acordo com adaptação do estabelecido por ABNT (1994b) para o ensaio de dosadores de sementes, as inclinações -6,55° e 6,55° foram estabelecidas de acordo com exigências do DCCR. As rotações mínima e máxima de acionamento, 25 e 125 rpm

foram definidas em acordo com a faixa utilizada por Bonotto (2012), Garcia (2011) e Camacho-Tamayo et al. (2009), as demais rotações são exigências do DCCR.

Tabela 4 - Valores codificados e absolutos para as três variáveis independentes dos experimentos.

	X_1 (°)					X_2 (°)					X_3 (rotações min ⁻¹)				
Valores codificados	-1,68	-1	0	+1	+1,68	-1,68	-1	0	+1	+1,68	-1,68	-1	0	+1	+1,68
Valores absolutos	-11	-6,55	0	+6,55	+11	-11	-6,55	0	+6,55	+11	25	45	75	105	125

As inclinações longitudinais positivas, Figura 7a, e negativas, Figura 7c, simulam o deslocamento da semeadora-adubadora quando a mesma encontra-se em trajetória ascendente e descendente, respectivamente. Já as inclinações transversais negativas, Figura 7d, e positivas, Figura 7f, simulam inclinações para esquerda e direita, respectivamente, tendo como referência o observador localizado na parte posterior dos dosadores.

Para cada tipo de fertilizante e mecanismo dosador foram realizadas 19 UE. A Tabela 5 apresenta a matriz dos tratamentos codificados. O processamento dos dados bem como a geração dos modelos matemáticos foi realizada com auxílio do programa computacional StatSoft STATISTICA® 7.0. O modelo estatístico proposto, Equação 3, é formado pelos seguintes componentes: efeito de uma constante, efeito linear das variáveis independentes, efeito quadrático das variáveis independentes e pelo efeito das interações lineares entre as variáveis independentes. O modelo proposto baseia-se nos modelos propostos por Dacanal et al. (2010) e Garcia (2007).

$$\hat{Y} = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1^2 + b_5X_2^2 + b_6X_3^2 + b_7X_1X_2 + b_8X_1X_3 + b_9X_2X_3 \quad (3)$$

em que,

\hat{Y} = taxa de aplicação de fertilizantes, g min⁻¹;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_9$ = estimadores dos parâmetros do modelo, adimensionais;

X_1, X_2, X_3 = valores codificados das variáveis independentes, adimensionais.

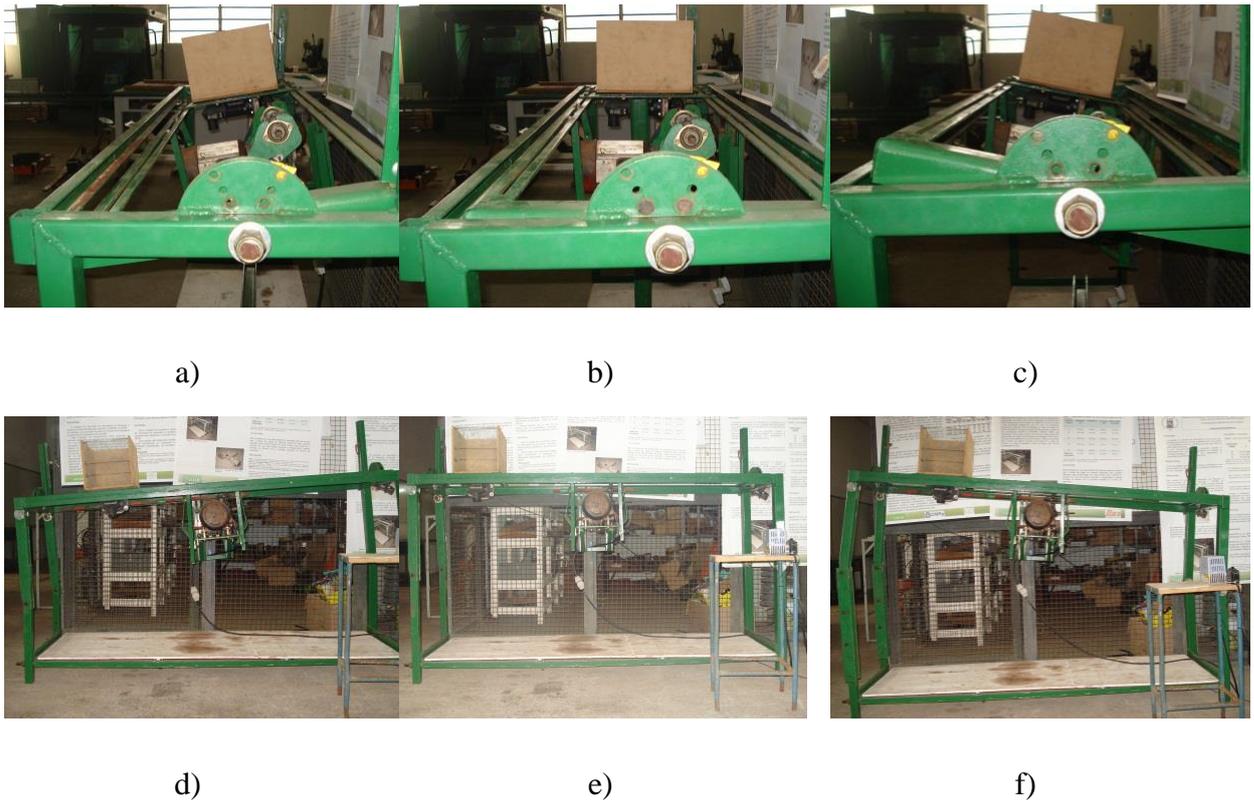


Figura 7 - Simulação de inclinações BANFERTI II. a) Inclinação longitudinal positiva. b) Inclinação longitudinal 0. c) Inclinação longitudinal negativa. d) Inclinação transversal negativa. e) Inclinação transversal 0. f) inclinação transversal positiva.

Após a geração dos modelos, cada um dos seus componentes foi submetido a uma análise de variâncias e um teste de hipóteses, $H_0: p \geq \alpha$ versus $H_1: p \leq \alpha$, em que α é o nível de significância de 5%, através do qual foram definidos os componentes significativos e realizada a reparametrização do modelo. O modelo reparametrizado é aquele que apresenta somente os componentes significativos. A reparametrização dos modelos pode ser visualizada no Apêndice A.

Devido ao uso de variáveis em código, é necessário realizar ainda a decodificação do modelo. A decodificação consiste em determinar os valores dos estimadores dos parâmetros do modelo que permitam o uso das variáveis em seus valores reais. Ou seja, quando em código as variáveis apresentam valores adimensionais de -1,68, -1, 0, 1 e 1,68, após decodificadas, X_1 e X_2 apresentam valores em graus, e X_3 apresenta valores de velocidade de acionamento em rpm. A variável dependente Y , tanto no modelo codificado quanto decodificado apresenta-se em g min^{-1} .

Tabela 5 - Matriz dos tratamentos em DCCR.

Ensaio	X1	X2	X3
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1
9	-1,68	0	0
10	1,68	0	0
11	0	-1,68	0
12	0	1,68	0
13	0	0	-1,68
14	0	0	1,68
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0

Tanto os tratamentos quanto os resultados foram tabulados como matrizes, Tabela 5, e, fazendo-se uso da propriedade da matriz inversa, podem ser determinados os estimadores dos parâmetros do modelo para variáveis decodificadas. Para tanto, foi utilizado o programa computacional MATLAB® R2008b sendo solucionada pelo programa a Equação 4, semelhante ao realizado por Garcia (2007).

$$b = inv((trat' * trat)) * trat' * y \quad (4)$$

em que,

b = Matriz dos estimadores do modelo;

inv = Matriz inversa;

$trat$ = Matriz dos componentes significativos do modelo (modelo reparametrizado);

$trat'$ = Matriz transposta dos componentes significativos;

y = Matriz dos resultados de predição do modelo codificado.

2.2.1 Análise de regressão

A análise de regressão foi realizada através da análise de variâncias no software StatSoft STATISTICA 7.0. No teste F, em sendo o fator F calculado maior que o fator F tabelado, constata-se que a regressão é significativa. A Tabela 6 apresenta as equações que compõe a análise de variâncias da análise de regressão e do coeficiente de determinação, R^2 . Além da significância dos modelos é importante conhecer os erros absolutos e relativos, conforme as Equações 5 e 6, respectivamente.

$$EA = VO - VP \quad (5)$$

em que,

EA = Erro de ajuste, $g \text{ min}^{-1}$;

VO = Valor observado, $g \text{ min}^{-1}$;

VP = Valor previsto pelo modelo, $g \text{ min}^{-1}$.

Tabela 6 - Análise de variâncias.

Causas de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrados Médios	F Calculado	R^2
CV	GL	SQ	QM	Fcalc	
Regressão Linear	1	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{1}$	$\frac{QMRL}{QMRes}$	$\frac{SQRL}{SQTotal C.}$
Resíduo	$n - 2$	$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{(n - 2)}$	-	-
Total Corrigido	$n - 1$	$\sum_{i=1}^n y_i^2 - n\bar{y}^2$	-	-	-

Em relação ao coeficiente de determinação R^2 , quanto mais próximo de 1 for o seu valor, melhor pode ser considerado o modelo pois maior será a variação explicada pelo modelo em relação a variação total. Para determinação dos erros, são realizadas comparações entre os valores observados nas coletas de dados e os valores previstos pelo modelo. Quanto

menores forem seus valores, melhor a qualidade do modelo pois, significa que mais próximos foram os valores previstos dos observados.

Para que os modelos tenham elevada qualidade, a ponto de permitir sua utilização para a predição da aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais, inclinações transversais e velocidade de acionamento, é necessário que os erros relativos sejam menores que 10%. Esse limite é atribuído pois, se o erro ocasionado pelo efeito de inclinações, segundo Bonotto et al. (2011) é da ordem de 10%, logo erros relativos maiores que esse limite demonstram que o modelo não é capaz de ser utilizado para a correção da taxa de aplicação.

$$ER = \left| \frac{(VO-VP)}{VO} \times 100 \right| \quad (6)$$

em que,

ER = Erro relativo, % em módulo;

VO = Valor observado, g min⁻¹;

VP = Valor previsto pelo modelo, g min⁻¹.

2.3 Material

2.3.1 Bancada de ensaios

Foi utilizada a Bancada para testes com dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas – BANFERTI II, Figura 8. Segundo Moreira et al. (2011), desenvolvedores da BANFERTI II, a mesma é dotada de uma mesa de inclinações capaz de simular inclinações transversais e longitudinais de 21° a -21°.

O acionamento do eixo dos dosadores é realizado através de um motor elétrico de 0,735 kw, acoplado a um redutor de engrenagens com relação de transmissão 10:1, Figura 8, item 3, e inversor de frequências WEG CFW 10, Figura 8, item 4.

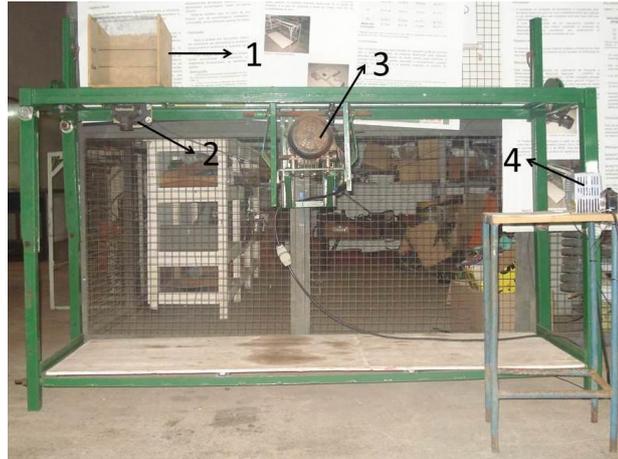


Figura 8 - Bancada para testes com dosadores de fertilizantes, BANFERTI II. 1 – Reservatório de fertilizante, 2 - Mecanismo dosador, 3 - Motor elétrico, 4 - Inversor de frequências.

Para determinação das frequências inseridas no inversor de frequências CFW 10 que representaram as velocidades de acionamento dos tratamentos, foi utilizado um tacômetro microprocessado digital Instrutherm TD-706. Foram inseridas frequências no inversor e medidas as velocidades no eixo final de transmissão de movimento aos dosadores. Esses valores foram tabulados no programa computacional Microsoft Excel sendo gerada uma linha de tendências com regressão linear, conforme a Figura 9. A partir da equação apresentada na Figura 9, foram então definidas as frequências dos tratamentos, conforme Tabela 10.

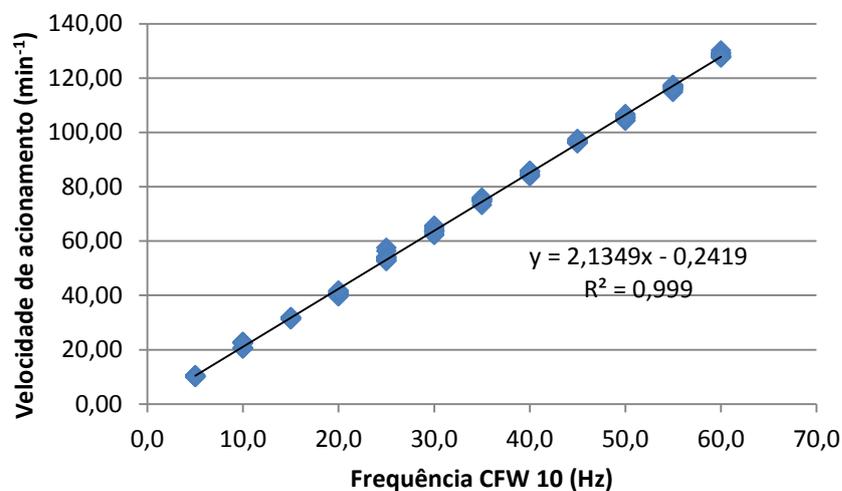


Figura 9 – Equação linear para determinação da velocidade de acionamento dos dosadores em função da frequência do inversor CFW 10.

A fim de verificar as inclinações de forma rápida, prática e precisa, foi utilizado um clinômetro digital Pittsburgh, modelo 95998, conforme a Figura 10. Este equipamento possui precisão decimal, permitindo ajustar a mesa de inclinações da BANFERTI II de acordo com as inclinações necessárias aos tratamentos.



Figura 10 - Clinômetro digital Pittsburgh Modelo 95998.

2.3.2 Fertilizantes

Como os fertilizantes apresentam 3 classificações quanto ao seu tipo, e diversas formulações de nutrientes NPK, foram utilizados um fertilizante de cada tipo, com formulações comercialmente usuais, a fim de que sejam atendidos com representatividade os tipos de fertilizantes mais encontrados no Brasil, conforme a Tabela 7.

Tabela 7 - Fertilizantes utilizados nos experimentos.

Fertilizante	Tipo	Formulação (NPK)
Fertilizante 1	Mistura granulada	16-16-16
Fertilizante 2	Mistura de grânulos	05-20-20
Fertilizante 3	Mistura farelada	00-15-30

Para classificar os fertilizantes utilizados e permitir comparações com demais fertilizantes, foram determinadas algumas propriedades físicas dos mesmos.

a) Densidade aparente

É a relação de massa por unidade de volume de fertilizante sem que seja realizada compactação do mesmo. Para determinação da densidade aparente, Equação 7, foram utilizados proveta volumétrica e balança de precisão.

$$Da = \frac{m}{v} \quad (7)$$

em que,

Da = Densidade aparente, g cm⁻³;

m = massa de fertilizante, g;

v = volume, cm³.

b) Teor de água

O teor de água, ou umidade, representa o percentual de água contido nos fertilizantes. Para sua determinação foram coletadas amostras de massa previamente conhecida e mantidas na estufa a 105°C por 24h. Após as 24h a massa foi novamente mensurada sendo calculada a umidade pela Equação 8.

$$U = \left[\frac{Mfu - Mfs}{Mfs} \right] \times 100 \quad (8)$$

em que,

U = Teor de água, %;

Mfu = Massa de fertilizante úmido, g;

Mfs = Massa de fertilizante seco, g.

c) Ângulo de repouso

Segundo Silva et al. (2006) é importante conhecer o ângulo de repouso pois este interfere no armazenamento do produto além de que, quando o produto encontra-se em condições de confinamento praticamente nulas (condição observada no reservatório de fertilizante de semeadoras-adubadoras), o ângulo de repouso e o ângulo de atrito interno, que interfere no fluxo do produto, são iguais.

Para determinação do ângulo de repouso foi utilizado um dispositivo dotado de um reservatório em formato de funil, mecanismo de controle da descarga de fertilizante e base plana na qual o fertilizante é depositado após ser descarregado de uma altura fixa, conforme Figura 11. Após a descarga do fertilizante, o cone formado foi fotografado e a determinação do ângulo de repouso foi realizada através de análise das imagens no programa computacional AutoCAD 2008. O ângulo de repouso, densidade aparente e teor de água dos fertilizantes utilizados são apresentados na Tabela 8.



Figura 11 - Dispositivo utilizado para determinação do ângulo de repouso dos fertilizantes.

O dispositivo utilizado, Figura 11, possui dimensões de 0,6 x 0,4 x 0,4m, altura, largura e profundidade, respectivamente. Após a abertura do reservatório, o fertilizante é liberado de uma altura de 0,45m, sendo depositado sobre uma base circular com aproximadamente 550cm².

Tabela 8 - Propriedades físicas dos fertilizantes utilizados.

Propriedade Física	Fertilizante		
	Mistura de Grânulos 05-20-20	Mistura Granulada 16-16-16	Mistura Farelada 00-15-30
Densidade (g cm ⁻³)	0,98	0,82	1,24
Ângulo de Repouso (°)	31,73	38,51	31,97
Teor de água (%)	4,12	3,61	2,02

d) Granulometria

A granulometria é o processo pelo qual busca-se definir, para faixas pré-estabelecidas, a porcentagem de massa que cada faixa possui em relação a massa total. Para realização da análise granulométrica foram coletadas amostras com massa previamente estabelecidas e as mesmas foram passadas por peneiras metálicas com perfurações de 4,00, 2,00, 1,00 e 0,50mm sendo posteriormente mensuradas as massas retidas em cada peneira. Para classificação dos fertilizantes quanto a sua granulometria foi utilizado como referencia a ABNT (1994a). A Tabela 9 apresenta o resultado da análise granulométrica.

Tabela 9 - Resultado da análise granulométrica dos fertilizantes utilizados.

Peneira (mm)	Fertilizante		
	Mistura de Grânulos 05-20-20	Mistura Granulada 16-16-16	Mistura Farelada 00-15-30
	Porcentagem Retida Acumulada Peneira ⁻¹		
4,00	2,28	2,09	0,66
2,00	78,21	70,17	1,80
1,00	99,31	85,34	5,84
0,50	99,97	94,68	25,76
Fundo	100,00	100,00	100,00

Analisando os resultados apresentados na Tabela 9 e comparando-os com a classificação da ABNT (1994a), Tabela 2, conclui-se que os fertilizantes utilizados nos experimentos se enquadram em mistura de grânulos, mistura granulada e mistura farelada conforme informado pelos seus respectivos fabricantes.

2.3.3 Dosadores de fertilizantes

De forma semelhante ao realizado com os fertilizantes, buscou-se utilizar mecanismos dosadores que representem o cenário agrícola brasileiro adequadamente. Três dos cinco dosadores estudados, são responsáveis pela maior parte do mercado. Os outros dosadores, apesar de Silva (2003), Leindecker et al. (2011) e Francetto et al. (2012) afirmarem que sua participação no mercado é pequena, os resultados obtidos por Bonotto (2012) demonstram que tais mecanismos necessitam de mais estudos podendo ser empregados para solucionar problemas atuais na dosagem de fertilizantes em semeadoras-adubadoras e consequentemente ampliar sua participação no mercado devido a bons resultados.

a) Dosador D1

O dosador D1 é do tipo rotor helicoidal, com descarga de fertilizante por transbordo transversal, Figura 12. A descarga por transbordo transversal consiste em uma barreira à passagem do fertilizante posicionada ao fim do helicóide, perpendicularmente ao eixo do mesmo. O intuito desta barreira é aumentar a homogeneidade da distribuição do fertilizante, pois após ser transportado pelo helicóide o fertilizante acumula-se até ter quantidade suficiente para transpor a barreira e ser descarregado com um fluxo quase constante. O helicóide utilizado foi de passo de 50,8mm.

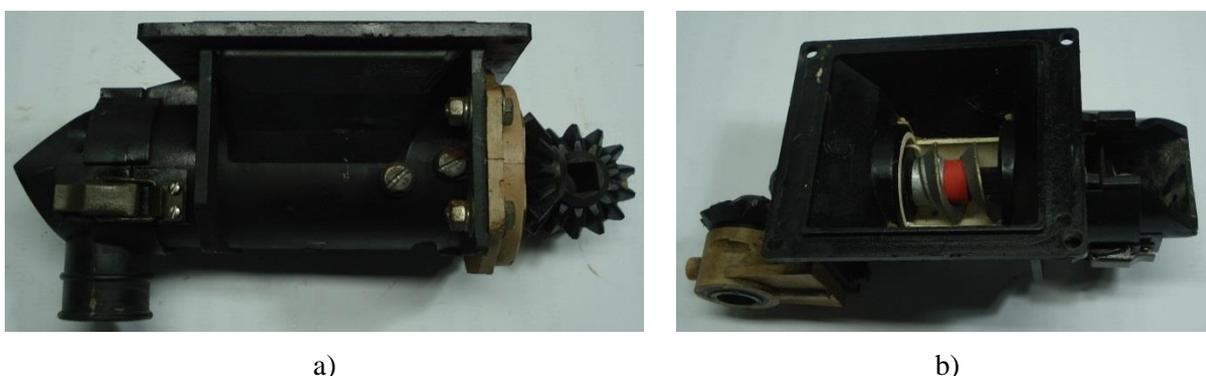


Figura 12 – Dosador D1. a) Vista lateral. b) Vista superior.

b) Dosador D2

O dosador D2 também é do tipo rotor helicoidal porém a sua descarga de fertilizante é realizada por transbordo lateral, Figura 13. O transbordo lateral tem o mesmo objetivo do transbordo transversal, do dosador 1, porém este encontra-se ao final do helicóide posicionado paralelo ao eixo do mesmo. O helicóide utilizado também foi o de passo de 50,8mm.



a)

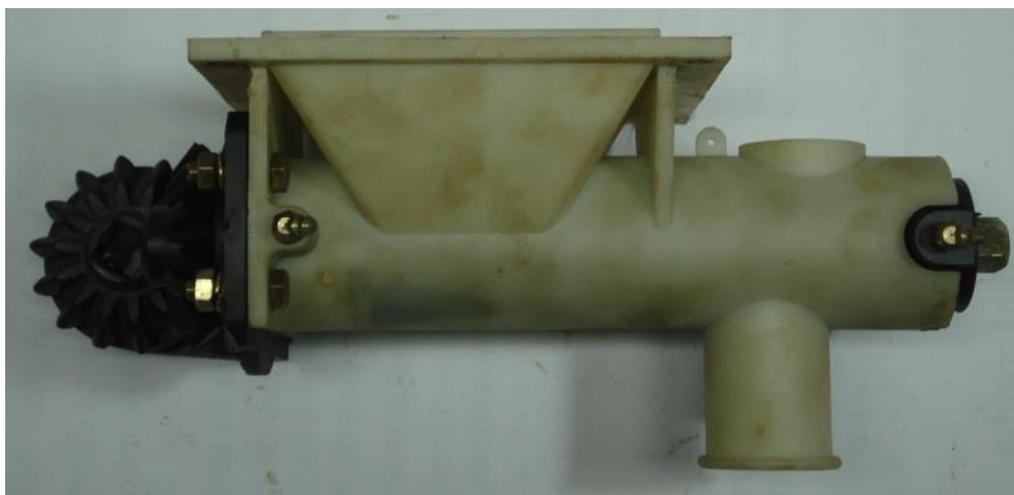


b)

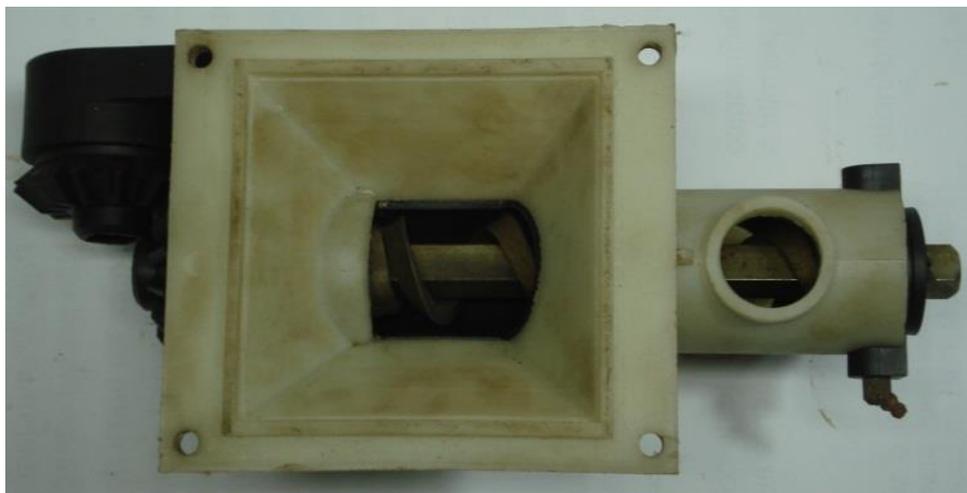
Figura 13 - Dosador D2. a) Vista lateral. b) Vista superior.

c) Dosador D3

O dosador 3 apresenta rotor helicoidal com descarga de fertilizante por gravidade, Figura 14. Diferente dos dosadores D1 e D2 este dosador não apresenta nenhuma barreira à descarga do fertilizante após sua passagem pelo helicoide, ficando assim o fluxo ligeiramente heterogêneo. O helicoide utilizado foi o de passo de 50,8mm.



a)



b)

Figura 14 - Dosador D3. a) Vista lateral. b) Vista superior.

d) Dosador D4

O dosador 4 é do tipo rotor acanalado reto, também conhecido como rotor canelado, Figura 15. Este mecanismo dosador também é utilizado para dosagens de sementes em semeadoras de fluxo contínuo podendo ser do tipo rotor acanalado reto ou helicoidal. A dosagem de fertilizantes é variada através da rotação de acionamento, área do rotor exposta ao reservatório de fertilizante bem como através da abertura de uma comporta na saída do dosador. Neste trabalho, para alteração do fluxo de fertilizante, foi modificada apenas a rotação de acionamento estando a comporta totalmente aberta e a área máxima do rotor exposta ao reservatório.



a)

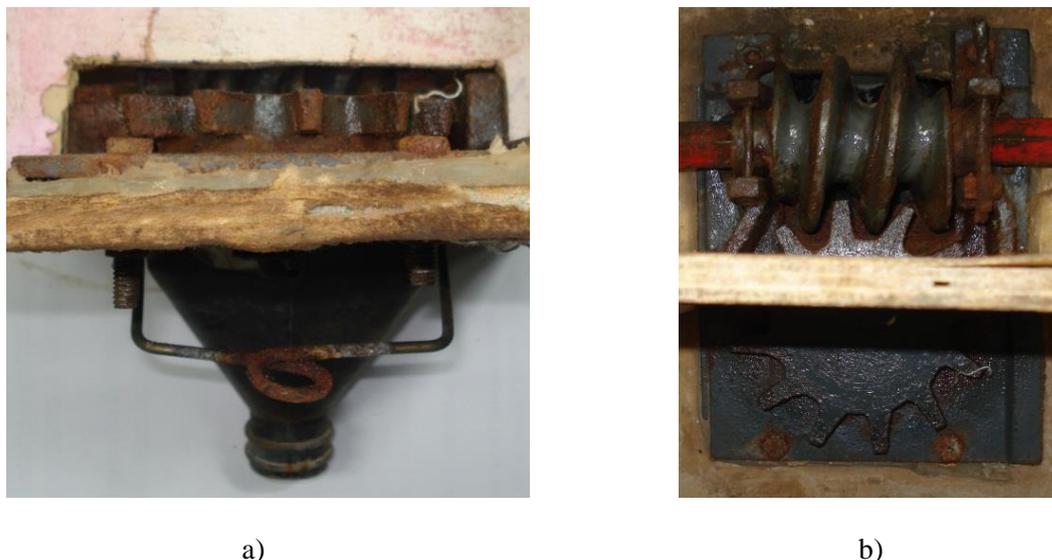


b)

Figura 15 - Dosador D4. a) Vista lateral. b) Vista superior.

e) Dosador D5

O dosador 5 é tipo rotor dentado, Figura 16. Este mecanismo é composto por um eixo helicoidal, que atua como engrenagem motora (pinhão) ao acionamento de um rotor dentado com doze dentes que ao se moverem, em contato com o fertilizante do reservatório, o deslocam até o tubo de descarga de fertilizante.



a)

b)

Figura 16 - Dosador D5. a) Vista frontal. b) Vista superior.

Devido a suas disposições construtivas, o dosador D5 teve acionamento diferenciado dos demais dosadores. Invés de ser ligado diretamente no eixo após a saída do redutor de engrenagens, o acionamento foi realizado utilizando-se uma corrente conectada a uma engrenagem motora de 26 dentes e uma engrenagem movida com 16 dentes. Além desse par de engrenagens, a movimentação do rotor dentado é realizada por um helicóide com relação de transmissão 12:1. Porém a configuração do inversor de frequências, que altera a rotação do motor elétrico, foi mantida a mesma para todos os dosadores. A Tabela 10 apresenta as frequências e suas respectivas rotações de acionamento do dosador D5 e dos demais dosadores.

Tabela 10 – Frequências e rotações de acionamento dos demais dosadores e do dosador 5 em min^{-1} .

Frequência CFW 10 (Hz)	11,8	21,3	35,2	49,2	58,7
Dosadores D1 a D4	25	45	75	105	125
Dosador 5	3,39	6,09	10,16	14,22	16,93

Para todos os mecanismos dosadores foram utilizados reservatórios de fertilizante com a parte frontal confeccionada em vidro e as demais partes em madeira com dimensões 0,32 x 0,235 x 0,25m comprimento, largura e profundidade, respectivamente, com capacidade para armazenar 0,0188m³ (18,8L) de fertilizante.

2.4 Coleta de dados

A sequência de fertilizantes e mecanismos dosadores dos ensaios foi definida de forma aleatória. Para as coletas o reservatório de fertilizantes foi preenchido com 50% de sua capacidade, conforme ABNT (1994b). A determinação da taxa de aplicação, g min⁻¹, foi realizada através da mensuração da massa de fertilizantes coletada num intervalo de 30s após estabilização do sistema (BONOTTO, 2012; BONOTTO et al., 2011; FERREIRA et al., 2010). O fertilizante descarregado foi coletado imediatamente após a saída do mecanismo dosador, ou seja, não foram utilizados tubos condutores a fim de que seja eliminada a interferência dos mesmos isolando assim os efeitos dos mecanismos dosadores e dos fertilizantes. Para controle do tempo nas coletas de dados foi utilizado um cronômetro digital LiveUp modelo LS3193. Para a mensuração da massa de fertilizantes coletada foi utilizada uma balança digital, com precisão decimal Kitchen Scale modelo SF-400.

2.5 Simulações

Gaona (1995) afirma que a simulação é uma das ferramentas de análise mais poderosas disponíveis, é eficaz para o planejamento, projeto e controle de sistemas, e, atualmente, é indispensável para engenheiros, desenhistas e gerentes.

Logo, utilizando os modelos matemáticos desenvolvidos, é possível realizar simulações, e através destas determinar os melhores níveis de cada variável, para cada dosador e fertilizante, valores máximos e mínimos de taxas de aplicação, comportamento da taxa de aplicação em função de inclinações, entre outros. Desta forma, através de simulações foram determinados os seguintes parâmetros:

2.5.1 Máxima e mínima taxas de aplicação

A taxa de aplicação é denominada quando se expressa a descarga de fertilizantes através de uma unidade de massa por uma unidade de tempo, g min^{-1} , diferente da dose, que expressa a descarga de fertilizante através de uma unidade de massa por uma unidade de área, kg ha^{-1} . Desta forma, para uma mesma taxa de aplicação pode-se obter, em função da velocidade de deslocamento e do espaçamento entre linhas de cultivo, diferentes doses. A determinação das máximas e mínimas taxas de aplicação foi realizada por derivadas parciais de primeira e segunda ordem. Em situações que não se pôde determinar os pontos críticos, máximos e mínimos, através de derivadas parciais, pois a função é crescente ou decrescente no ponto definido pelas mesmas, foi utilizada a função SOLVER do programa computacional Microsoft Excel.

2.5.2 Intervalo de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação

No momento da regulagem dos dosadores de fertilizante de semeadoras-adubadoras, é comum que os agricultores efetuem este processo na sede da propriedade rural, em galpões, estradas ou até mesmo em porções planas da lavoura. Geralmente, estes locais proporcionam condições de terreno nivelado, ou próximo ao nível. Porém, como as inclinações afetam a taxa de aplicação de fertilizantes, esta regulagem resulta em erros. Para Cerri (2001), ao trabalhar em AP, o erro máximo tolerável, para máquinas precisas, é de 5%. Ou seja, para que um dosador de fertilizantes possa ser considerado preciso, e utilizado em AP, a taxa de aplicação de fertilizantes poderá variar 5% para mais ou para menos da dose desejada.

Para determinação da variação ocasionada pelas inclinações longitudinais e transversais, inicialmente foram determinadas matematicamente, através da função solver do software Microsoft EXCEL, as velocidades de acionamento correspondentes as doses adotadas como referência de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} . Para determinação destas velocidades de acionamento os dosadores foram considerados nivelados, a exemplo da regulagem realizada habitualmente pelos agricultores, e com a velocidade de deslocamento e espaçamento entre linhas ajustados a fim de que sejam atingidas tais doses.

Também a partir da função solver, estas velocidades de acionamento foram mantidas fixas, e alterados os valores das inclinações longitudinais e transversais, quando estas foram significativas. Logo, inclinações que ocasionaram taxas de aplicação 5% maiores ou menores que a referência foram consideradas como não recomendadas ao dosador e tipo de fertilizante. A Tabela 11 mostra os valores mínimo e máximo nos quais é possível em cada dose, operar dentro do limite estabelecido como tolerável. Também foram determinados os desvios para as inclinações de trabalho extremas, -11 e 11°, sendo apresentadas a diferença entre as taxas de aplicação obtidas nessas inclinações em relação a dose de referência.

Tabela 11 – Variação da dose representada pelo limite de 5%.

	Dose (kg ha ⁻¹)		
	Mínimo	Indicada	Máximo
	190	200	210
	285	300	315
	380	400	420
	475	500	525

Na Figura 17 pode ser visualizado o fluxograma da realização da modelagem matemática efetuada para cada dosador e fertilizante.

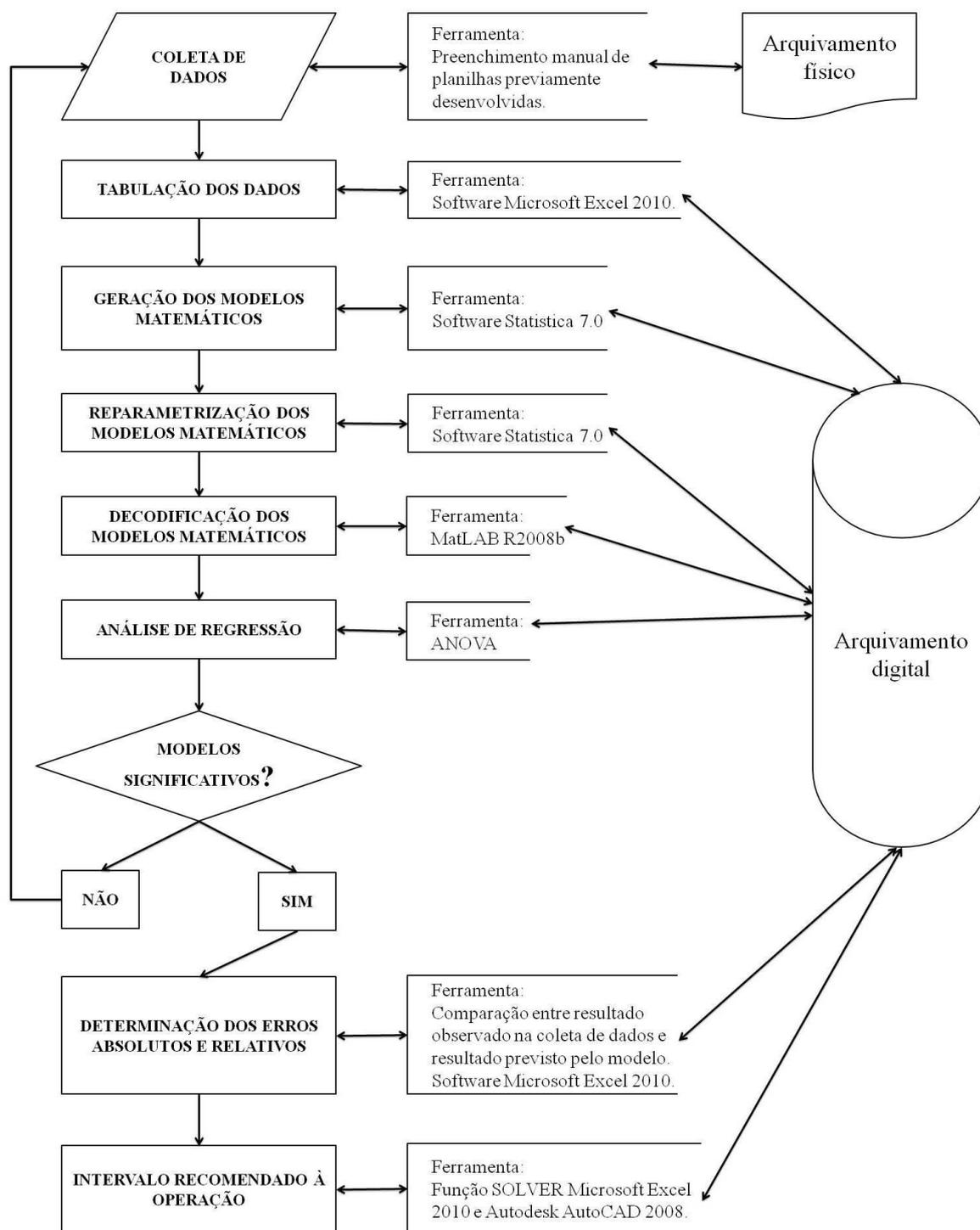


Figura 17 - Fluxograma da realização dos experimentos para modelagem matemática de cada dosador e fertilizante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor compreensão dos resultados, estes foram subdivididos. Inicialmente serão apresentados os modelos matemáticos, sua análise de regressão e seus erros, sendo agrupados por tipo de fertilizante. Na segunda etapa serão discutidas as simulações realizadas de forma individual para cada tipo de dosador e fertilizante.

3.1 Modelos matemáticos

A partir dos dados coletados, utilizando o programa computacional Statsoft Estatística 7.0, foram desenvolvidos os modelos matemáticos codificados completos. Este modelo faz uso das variáveis adimensionais e em códigos, -1,68, -1, 0, 1 e 1,68. O fato de ser completo indica que foram determinados coeficientes de regressão para todas as variáveis, como o modelo proposto na Equação 3.

3.1.1 Fertilizante mistura granulada 16-16-16

A Tabela 12, mostra os tratamentos codificados e os resultados observados nas coletas de dados para os cinco dosadores estudados e o fertilizante mistura granulada. A partir dos dados observados, foram determinados os coeficientes de regressão para as variáveis significativas, como mostra a Tabela 13.

Analisando a Tabela 13, é possível observar que cada um dos dosadores apresentou particularidades quanto as variáveis significativas pois, para nenhum estas foram as mesmas. Foram comuns a todos os dosadores a significância da constante, IL, e R. O efeito da constante e de R já era esperado para todos, porém o efeito de IL, apesar de possuir magnitudes diferentes para cada dosador, demonstra que todos têm sua taxa de aplicação alterada em função de inclinações longitudinais. O dosador menos sensível ao efeito das variáveis foi D1, que apresentou três combinações das variáveis significativas, entre as dez

combinações possíveis. Já os dosadores D2 e D5 foram os mais sensíveis, apresentando sete combinações significativas.

Tabela 12 - Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min^{-1} , para o fertilizante mistura granulada 16-16-16.

IL	IT	R	D1	D2	D3	D4	D5
-1	-1	-1	1.710,00	778,00	1.514,00	1.000,00	1.240,00
1	-1	-1	1.916,00	952,00	1.806,00	1.518,00	998,00
-1	1	-1	1.708,00	738,00	1.534,00	1.042,00	1.222,00
1	1	-1	1.830,00	920,00	1.802,00	1.644,00	978,00
-1	-1	1	3.970,00	1.856,00	3.524,00	2.184,00	2.838,00
1	-1	1	4.042,00	2.168,00	4.074,00	3.124,00	2.380,00
-1	1	1	4.044,00	1.720,00	3.518,00	2.402,00	2.718,00
1	1	1	4.374,00	2.082,00	4.090,00	3.408,00	2.206,00
-1,68	0	0	2.756,00	1.230,00	2.368,00	2.444,00	2.198,00
1,68	0	0	3.248,00	1.586,00	3.056,00	3.118,00	1.542,00
0	-1,68	0	2.974,00	1.492,00	2.882,00	1.836,00	1.834,00
0	1,68	0	3.078,00	1.350,00	2.638,00	1.956,00	1.742,00
0	0	-1,68	1.038,00	422,00	864,00	670,00	604,00
0	0	1,68	5.152,00	2.296,00	4.362,00	3.398,00	2.926,00
0	0	0	2.976,00	1.396,00	2.652,00	2.304,00	1.830,00
0	0	0	2.908,00	1.376,00	2.644,00	2.268,00	1.788,00
0	0	0	2.800,00	1.396,00	2.636,00	2.216,00	1.806,00
0	0	0	2.830,00	1.372,00	2.626,00	2.142,00	1.810,00
0	0	0	2.872,00	1.368,00	2.642,00	2.174,00	1.794,00
Média (g min^{-1})			2.959,26	1.394,63	2.696,42	2.149,89	1.813,37

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Considerando o efeito isolado de IL, ou seja, desconsiderando o efeito das demais variáveis, o dosador D4 é que apresenta o maior estimador de regressão. O estimador de regressão consiste no valor numérico, adimensional, que multiplica a variável, no caso em questão é igual a 46,98. Tal estimador faz com que as variações ocasionadas por IL resultem em maiores alterações da taxa de aplicação. Os dosadores D1, D2, D3 e D4, possuem

estimadores de regressão positivos o que significa que inclinações positivas, 0 a 11°, causam aumento da taxa de aplicação e, inclinações negativas, -11 a 0°, ocasionam reduções. Para o dosador D5 este efeito se manifesta de forma contrária, pois seu estimador possui sinal negativo.

Tabela 13 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura granulada 16-16-16.

Dosador	Cte.	IL	IL ²	IT	IT ²	R	R ²	ILIT	ILR	ITR
D1	-106,58	17,42	*ns	ns	ns	39,84	ns	ns	ns	ns
D2	-19,73	2,93	ns	1,25	0,35	18,68	ns	ns	0,20	-0,10
D3	-25,89	4,73	ns	ns	1,16	35,53	ns	ns	0,36	ns
D4	-399,12	46,98	3,64	ns	-3,67	44,23	-0,12	ns	ns	ns
D5	33,19	-5,36	0,60	6,86	ns	174,57	ns	ns	-2,29	-1,21

*ns = Não significativo.

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Os dosadores D4 e D5 foram os únicos a apresentar efeito de IL² e, em ambos, o estimador apresenta sinal positivo. Isso significa que, ao considerar o efeito quadrático de IL, para todos valores, positivos ou negativos, esta irá ocasionar aumento na taxa de aplicação.

Segundo Bonotto (2012) ao realizar experimentos com os mesmos dosadores e tipo de fertilizante, todos os mecanismos apresentaram diferença significativa entre as inclinações longitudinais de -11°, 0° e 11° em todas velocidades de acionamento estudadas. O dosador D3 foi o que apresentou o maior coeficiente de variação, chegando a aproximadamente 25% na menor vazão. O menor coeficiente de variação observado foi obtido para D4, próximo a 5%. Inicialmente, a magnitude dos estimadores de regressão para D4, Tabela 13, não demonstra que seu desempenho seja melhor que o dos demais dosadores, porém, através das simulações, o seu desempenho será comparado com os demais dosadores.

Em relação a IT, seu efeito linear foi significativo para os dosadores D2 e D5 apenas, sendo para D5 de maior magnitude, se considerada isoladamente. Em ambos, os estimadores

de regressão apresentam sinal positivo. Com isso, inclinações transversais positivas causam aumentos na taxa de aplicação enquanto que inclinações negativas causam reduções. Já o efeito quadrático, IT^2 , foi significativo para os dosadores D2, D3 e D4. Para D2 e D3 os estimadores possuem sinais positivos e, com isso, todos valores de IT irão ocasionar aumentos na taxa de aplicação. Para D4, com estimador negativo, todos valores de IT irão ocasionar reduções. Bonotto (2012) afirma que, ao analisar inclinações transversais, os dosadores D2, D4 e D5 apresentam diferença significativa entre os níveis -11, 0 e 11° na vazão de $50g\ s^{-1}$. Para os demais dosadores e vazões, a diferença foi significativa apenas entre dois níveis, ou seja, entre -11 e 0°, 0 e 11° ou -11 e 11°.

O dosador D4 foi o único a apresentar efeito significativo de R^2 , e com sinal negativo que significa que para todos valores de R, esta porção do modelo irá ocasionar reduções na taxa de aplicação. Este efeito é observado devido as disposições construtivas do dosador que, com o aumento da velocidade passa a não ter capacidade de preencher completamente os canais do rotor, responsáveis por dosar a quantidade de fertilizante pré-estabelecida. Com isso a taxa de aplicação para velocidades altas deixa de apresentar efeito linear de aumento e passa a diminuir.

Nos dosadores D2 e D5 observa-se o efeito de IL e IT na interação com R, ou seja, quanto maior a velocidade de acionamento, maiores serão as alterações da taxa de aplicação ocasionadas por estas variáveis. Para D2, inclinações longitudinais positivas e inclinações transversais negativas, implicam em aumentos na taxa de aplicação e, inclinações longitudinais negativas e inclinações transversais positivas em reduções. Para D5, inclinações, tanto longitudinais quanto transversais, negativas implicam em aumento, enquanto inclinações positivas em reduções. O dosador D3 apresentou efeito apenas entre as interações entre IL e R sendo que as alterações ocasionadas na taxa de aplicação serão as mesmas do dosador D2, pois o sinal do coeficiente de regressão também é positivo.

É necessário ainda saber se os modelos matemáticos gerados são significativos. Isso é feito através da análise de regressão, a Tabela 14 apresenta o resumo das mesmas. É possível observar que todos os modelos foram significativos, p -valor $\leq 0,05$, além disso, para todos dosadores o percentual de variação explicada, R^2 , foi superior a 90% sendo que o maior foi o do dosador D5 e o menor, do dosador D4.

Coefficientes de determinação, R^2 , elevados, apesar de representar maior qualidade do modelo, podem ser associados a modelos complexos, onde é significativo o efeito linear, quadrático e de interação entre as variáveis, modelos observados para os dosadores D2 e D5, por exemplo. Garcia (2007) ao realizar o desenvolvimento de um sistema de controle

eletromecânico de semeadura e adubação encontrou problemas na implementação de modelos matemáticos complexos. O microprocessador utilizado ficava lento e com falhas na execução dos cálculos. Apesar do modelo que considerava o efeito quadrático das variáveis apresentar coeficiente de determinação mais elevado, foi necessária a implementação de um modelo menos complexo e com coeficiente de determinação menor. Contudo, modelos complexos não representam em impedimentos a sua utilização, porém é provável que seja necessária a utilização de microprocessadores com maior capacidade de realização de cálculos e, conseqüentemente, mais caros.

Tabela 14 - Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura granulada 16-16-16 e os cinco dosadores estudados.

Dosador	CV	GL	SQ	QM	F calc	P-valor	R ²
D1	Regressão linear	1	19.473.446,35	19.473.446,35	1.066,07	0,0000	99,59
D2	Regressão linear	1	4.451.679,33	4.451.679,33	12.877,43	0,0000	99,88
D3	Regressão linear	1	15.927.278,27	15.927.278,27	4.392,04	0,0000	99,76
D4	Regressão linear	1	10.316.373,78	10.316.373,78	402,82	0,0000	95,95
D5	Regressão linear	1	7.307.143,21	7.307.143,21	13.628,62	0,0000	99,91

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Além de significativos, é necessário que os modelos apresentem erros de ajuste e relativos baixos. Os erros podem ser observados na Tabela 15. Segundo Bonotto (2012) o erro na taxa de aplicação ocasionado por inclinações longitudinais e transversais e da ordem de 10%, logo para que os modelos possam prever a taxa de aplicação com qualidade, é importante que seu erro relativo seja inferior a 10%. Observando os valores médios, todos os dosadores apresentaram valores inferiores a 10% porém, D1 e D4 apresentaram, em níveis isolados, valores acima do limite estabelecido.

Para D1, foi observado um erro relativo de 14,31% no nível IL, $IT = 0$, e $R = -1,68$. Como nos demais pontos onde IT e IL possuem valor 0, constata-se que esse erro é gerado por R, que corresponde a rotação de 25 min^{-1} . Este erro pode demonstrar tanto que o DCCR apresentou falha devido à falta de repetições no nível -1,68, como que o modelo de predição para D1 é menos preciso em baixas velocidades de acionamento. Para D4, foram observados

erros superiores a 10% em dois níveis, -18,16% em IL = -1, IT = -1 e R = 1, e 11,93% em IL = -1,68, IT e R = 0. Sem maiores estudos não se pode afirmar com precisão qual das três variáveis é responsável por esses erros elevados, porém é provável que estes sejam ocasionados pelas inclinações longitudinais negativas. De forma semelhante ao D1, estes podem ser ocasionados por deficiências do DCCR como pela falta de qualidade na predição do modelo do dosador D4 para inclinações negativas.

Tabela 15 - Erros de ajuste, $g \text{ min}^{-1}$, e erros relativos, %, para o fertilizante mistura granulada 16-16-16 e os cinco dosadores estudados.

IL	IT	R	Erros									
			D1		D2		D3		D4		D5	
			Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo
-1	-1	-1	128,41	7,51	-3,13	0,40	20,55	1,36	-41,96	-4,20	-17,68	-1,43
1	-1	-1	106,25	5,55	11,74	1,23	37,09	2,05	-139,34	-9,18	-5,73	-0,57
-1	1	-1	126,41	7,40	-2,57	0,35	40,55	2,64	0,04	0,00	-28,36	-2,32
1	1	-1	20,25	1,11	20,30	2,21	33,09	1,84	-13,34	-0,81	-18,41	-1,88
-1	-1	1	17,17	0,43	4,90	0,26	56,45	1,60	-396,58	-18,16	-12,54	-0,44
1	-1	1	-138,98	-3,44	-1,24	0,06	49,99	1,23	-71,95	-2,30	25,42	1,07
-1	1	1	91,17	2,25	-15,54	0,90	50,45	1,43	-178,58	-7,43	2,78	0,10
1	1	1	193,02	4,41	28,32	1,36	65,99	1,61	212,05	6,22	-13,27	-0,60
-1,68	0	0	66,36	2,41	49,05	3,99	78,78	3,33	291,46	11,93	4,75	0,22
1,68	0	0	175,06	5,39	4,14	0,26	67,97	2,22	-68,37	-2,19	-21,33	-1,38
0	-1,68	0	92,71	3,12	2,70	0,18	102,66	3,56	51,54	2,81	-30,92	-1,69
0	1,68	0	196,71	6,39	-8,16	0,60	-141,34	-5,36	171,54	8,77	-3,10	-0,18
0	0	-1,68	148,55	14,31	-25,35	6,01	1,64	0,19	39,98	5,97	-18,41	-3,05
0	0	1,68	278,87	5,41	-19,46	0,85	-52,89	-1,21	183,11	5,39	-61,61	-2,11
0	0	0	94,71	3,18	14,59	1,05	13,37	0,50	75,28	3,27	24,99	1,37
0	0	0	26,71	0,92	-5,41	0,39	5,37	0,20	39,28	1,73	-17,01	-0,95
0	0	0	-81,29	-2,90	14,59	1,05	-2,63	-0,10	-12,72	-0,57	0,99	0,05
0	0	0	-51,29	-1,81	-9,41	0,69	-12,63	-0,48	-86,72	-4,05	4,99	0,28
0	0	0	-9,29	-0,32	-13,41	0,98	3,37	0,13	-54,72	-2,52	-11,01	-0,61
Média			77,97	3,23	2,46	1,20	21,99	0,88	-0,0004	-0,28	-10,29	-0,74

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

De forma geral é possível afirmar que os modelos possuem elevada qualidade para a predição da taxa de aplicação do fertilizante mistura granulada 16-16-16 para os cinco dosadores estudados. Todos modelos foram significativos, apresentando coeficientes de determinação, R^2 , elevados e erros absolutos e relativos baixos. Permitindo assim, seu uso para a predição da taxa de aplicação de fertilizantes e a realização de simulações para determinações dos melhores parâmetros de operação.

3.1.2 Fertilizante mistura farelada 00-15-30

A Tabela 16, mostra os tratamentos codificados e os resultados observados nas coletas de dados para os cinco dosadores estudados e o fertilizante mistura farelada. A partir dos dados observados, foram determinados os coeficientes de regressão para as variáveis significativas, como mostra a Tabela 17.

Apesar de ser utilizado o mesmo fertilizante, bem como os mesmos tratamentos, é possível observar na Tabela 16 que as disposições construtivas do dosador afetam a taxa de aplicação, pois em todos os tratamentos, para os diferentes dosadores, os resultados observados foram diferentes, como já era esperado. Em relação aos dados médios, observa-se que o dosador D4, do tipo rotor acanalado, apresentou maior valor. Este fato provavelmente está associado a boa escoabilidade conferida ao fertilizante mistura farelada 00-15-30 por sua granulometria e ângulo de repouso, fazendo com que este preencha com facilidade os canais do dosador e seja liberado até o mecanismo de deposição.

Tabela 16 – Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min^{-1} , para o fertilizante mistura farelada 00-15-30.

IL	IT	R	D1	D2	D3	D4	D5
-1	-1	-1	3.844,00	2.034,00	2.436,00	2.602,00	3.478,00
1	-1	-1	2.942,00	2.174,00	3.262,00	3.998,00	1.972,00
-1	1	-1	2.618,00	2.130,00	2.496,00	2.630,00	3.574,00
1	1	-1	2.952,00	2.226,00	3.462,00	3.660,00	1.982,00
-1	-1	1	5.786,00	4.678,00	5.380,00	6.344,00	5.908,00
1	-1	1	6.470,00	5.068,00	6.658,00	8.036,00	4.372,00
-1	1	1	6.010,00	4.720,00	5.520,00	5.972,00	6.124,00
1	1	1	6.678,00	5.056,00	6.882,00	8.186,00	4.040,00
-1,68	0	0	4.168,00	3.406,00	3.748,00	4.198,00	5.906,00
1,68	0	0	4.922,00	3.712,00	5.412,00	6.674,00	2.766,00
0	-1,68	0	4.402,00	3.376,00	4.202,00	4.646,00	3.702,00
0	1,68	0	4.396,00	3.444,00	4.348,00	4.972,00	3.614,00
0	0	-1,68	1.366,00	1.204,00	1.528,00	1.594,00	1.504,00
0	0	1,68	7.428,00	6.058,00	6.904,00	8.178,00	5.650,00
0	0	0	4.316,00	3.670,00	4.260,00	4.808,00	3.622,00
0	0	0	4.190,00	3.710,00	4.236,00	4.784,00	3.644,00
0	0	0	4.166,00	3.730,00	4.196,00	4.740,00	3.654,00
0	0	0	4.194,00	3.728,00	4.196,00	4.736,00	3.608,00
0	0	0	4.434,00	3.688,00	4.188,00	4.638,00	3.628,00
Média (g min^{-1})			4488,53	3569,05	4384,95	5020,84	3828,84

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R- Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Na Tabela 17, assim como para o fertilizante mistura granulada, é possível constatar que cada dosador teve suas particularidades já que as variáveis que foram significativas são diferentes para todos. Ainda de forma semelhante ao fertilizante mistura granulada 16-16-16, foram significativas a todos dosadores os efeitos da constante e da velocidade de acionamento, R. O dosador menos sensível ao efeito das variáveis foi D1 que apresentou efeito significativo de apenas 3 variáveis, constante, R e a interação entre IL e R. Além do baixo número de variáveis significativas, o efeito de ILR possui coeficiente menor que os demais dosadores, ou seja, esta irá causar menores variações que nos demais. Já os dosadores mais sensíveis foram D2 e D3 que apresentaram efeito de 6 variáveis cada.

Tabela 17 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura farelada 00-15-30.

Dosador	Cte.	IL	IL ²	IT	IT ²	R	R ²	ILIT	ILR	ITR
D1	45,99	*ns	ns	ns	ns	56,08	ns	ns	0,10	ns
D2	175,71	-7,05	-1,27	ns	-2,50	47,07	ns	ns	0,31	ns
D3	180,14	40,10	3,74	9,73	ns	53,72	ns	ns	0,54	ns
D4	-196,48	46,23	6,32	ns	ns	65,77	ns	ns	0,95	ns
D5	602,85	-134,21	6,12	ns	ns	298,13	ns	-1,85	ns	ns

*ns = Não significativo.

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Quanto ao efeito isolado de IL, esta apresenta maior magnitude para D5, ou seja, é o dosador que, se forem desconsiderados os efeitos das demais variáveis, irá apresentar as maiores alterações na taxa de aplicação em função de inclinações longitudinais. D1, que não apresenta efeito significativo de IL não sofrerá alterações na taxa de aplicação em função de inclinações longitudinais. Porém isso não significa que o dosador não irá apresentar limites de inclinações longitudinais recomendados para a operação, pois estas, foram significativas na interação com R. Em contradição a isso, Bonotto (2012) afirma que D1 apresentou diferença estatística entre todas as inclinações, nas três vazões estudadas. Ao comparar os coeficientes de variação encontrados pelo autor, os dosadores D2 e D5 foram os que apresentaram menores valores, aproximadamente 5%. Enquanto D1 apresentou valores da ordem de 10%, D3 25% e D4 apresentou diferentes valores em função da vazão, ficando entre 15 e 25%.

Entre os dosadores que apresentam efeito significativo de IL, esta apresenta menor magnitude no dosador D2. Para D2 e D5, os coeficientes de regressão possuem sinais negativos, logo inclinações negativas irão ocasionar aumentos na taxa de aplicação, e inclinações positivas irão ocasionar diminuições, para D3 e D4 a alteração se dá de forma contrária, pois seus coeficientes de regressão possuem sinal positivo. Todos dosadores que apresentaram efeito linear das inclinações longitudinais, também apresentaram efeito de IL². A maior magnitude foi observada para D4, e a menor para D2. Nos dosadores D3, D4 e D5 os coeficientes de regressão possuem sinal positivo, o que significa que para qualquer valor de

inclinação longitudinal, a alteração na taxa de aplicação será de aumento. Para D2, qualquer valor irá ocasionar reduções, pois seu coeficiente de regressão apresenta sinal negativo.

Quanto ao efeito de IT, o dosador D3 apresentou efeito linear, com coeficiente positivo, e D2 apresentou efeito quadrático negativo. Comparado os dosadores D1, D2 e D3, que são dosadores helicoidais com mecanismos de controle de fluxo diferentes, é possível afirmar que D1 possui melhor controle de fluxo em função de inclinações transversais já que estas não afetam a sua taxa de aplicação, ou seja, não foi significativa. Corroborando com Bonotto (2012) que em seus experimentos encontrou coeficientes de variação entre 0,5 e 2% para D1. Já entre D2 e D3 não é possível afirmar qual possui melhor desempenho, pois entre inclinações transversais de aproximadamente -4 a 4° , D2 apresenta menores variações na taxa de aplicação, para valores diferentes destes, D3 apresenta menores variações. Para Bonotto (2012), para as vazões de 30 e 50 g s^{-1} , D3 apresentou menores valores de coeficiente de variação, ficando próximo a $0,5\%$. D2 apresentou valores da ordem de 2% . Além disso, para D2 todos valores de IT causam redução na taxa de aplicação, para D3 inclinações negativas causam reduções e positivas aumentos. Para nenhum dos dosadores foi observado o efeito da interação entre IT e R, ou seja, independente da velocidade de acionamento, nenhuma alteração proporcionada por IT, quando significativa, será a mesma independente de R.

O dosador D5, apesar de não apresentar efeito linear ou quadrático de IT, apresentou efeito desta na interação com IL, ou seja, tanto IT quanto IL irão causar variações na taxa de aplicação uma em função da outra. Como o coeficiente de regressão é negativo, quanto IL e IT possuírem sinais iguais ($++$, $--$), irá ocorrer uma redução da taxa de aplicação. Quando possuírem sinais diferentes ($+-$, $-+$), irá ocorrer um aumento. D5 foi o único dosador que não apresentou efeito da interação entre IL e R. Este fato provavelmente ocorre, pois este dosador é acionado em baixas velocidades.

Os dosadores D1, D2, D3 e D4 apresentaram efeito da interação entre IL e R. este efeito significa que a variação da velocidade de acionamento altera o efeito das inclinações longitudinais sobre a taxa de aplicação. Inclinações negativas irão ocasionar reduções na taxa de aplicação enquanto inclinações positivas irão ocasionar o aumento. O mesmo efeito foi observado por Bonotto (2012) e em seus experimentos, na média geral dos cinco dosadores a inclinação de -11° reduziu a taxa de aplicação em $7,75\%$ enquanto a inclinação de 11° aumentou em $20,06\%$.

Porém, para comprovar a qualidade de predição dos modelos, é necessário saber se os modelos matemáticos são significativos. A Tabela 18 mostra o resumo da análise de regressão. É possível observar que todos os modelos foram significativos, P-valor $\leq 0,05$,

além disso, para todos dosadores o percentual de variação explicada, R^2 , foi superior a 90% sendo que o maior foi o do dosador D3 e o menor, do dosador D1.

Tabela 18 – Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura farelada 00-15-30 e os cinco dosadores estudados.

Dosador	CV	GL	SQ	QM	F calc	P-valor	R^2
D1	Regressão linear	1	39.530.267,19	39.530.267,19	224,47	0,0000	97,86
D2	Regressão linear	1	27.152.555,85	27.152.555,85	8.611,40	0,0000	99,92
D3	Regressão linear	1	39.286.082,96	39.286.082,96	3.159,21	0,0000	99,94
D4	Regressão linear	1	61.813.458,91	61.813.458,91	2.037,88	0,0000	99,86
D5	Regressão linear	1	31.288.027,22	31.288.027,22	3.979,27	0,0000	99,64

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Contudo, o fato de os modelos apresentarem significância não representa que os mesmos possam ser utilizados para a predição. Para tanto é necessário conhecer seus erros de ajuste e relativos e estes, devem ser baixos. Analisando a Tabela 19, que mostra os erros dos dados previstos pelos modelos em relação aos dados observados, é possível constatar que, nenhum dos dosadores apresentou erro relativo médio superior a 10%. Porém, os dosadores D1, D2 e D5 apresentaram, em alguns pontos, erros relativos superiores a 10%. Para D1 e D5 é difícil afirmar qual das três variáveis é a responsável por esses erros, mas, para o dosador D2 observa-se que este erro se dá no nível -1,68 (25 rpm) de R, o que representa fragilidade do modelo em baixas velocidades de acionamento.

De forma geral é possível afirmar que os modelos possuem elevada qualidade para a predição da taxa de aplicação do fertilizante mistura farelada 00-15-30 para os cinco dosadores estudados. Todos modelos foram significativos, apresentando coeficientes de determinação, R^2 , elevados e erros absolutos e relativos baixos. Permitindo assim, seu uso para a predição da taxa de aplicação de fertilizantes e a realização de simulações para determinações dos melhores parâmetros de operação.

Tabela 19 - Erros de ajuste, g min^{-1} , e erros relativos, %, para o fertilizante mistura farelada 00-15-30 e os cinco dosadores estudados.

IL	IT	R	Erros									
			D1		D2		D3		D4		D5	
			Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo
-1	-1	-1	1.021,09	26,56	-62,58	-3,08	152,35	6,25	135,85	5,22	-10,91	-0,31
1	-1	-1	599,09	20,36	-16,44	-0,76	130,97	4,02	364,03	9,11	82,51	4,18
-1	1	-1	-204,91	-7,83	33,42	1,57	84,94	3,40	163,85	6,23	-73,41	-2,05
1	1	-1	609,09	20,63	35,56	1,60	203,56	5,88	26,03	0,71	251,01	12,66
-1	-1	1	105,24	1,82	-97,55	-2,09	110,71	2,06	332,94	5,25	14,77	0,25
1	-1	1	309,24	4,78	-46,40	-0,92	117,33	1,76	117,11	1,46	78,18	1,79
-1	1	1	329,24	5,48	-55,55	-1,18	123,30	2,23	-39,06	-0,65	72,27	1,18
1	1	1	517,24	7,75	-58,40	-1,16	213,92	3,11	267,11	3,26	-95,32	-2,36
-1,68	0	0	-83,84	-2,01	35,38	1,04	-24,51	-0,65	-11,54	-0,27	59,49	1,01
1,68	0	0	670,16	13,62	-22,10	-0,60	-140,27	-2,59	-119,09	-1,78	-127,21	-4,60
0	-1,68	0	150,16	3,41	-27,36	-0,81	99,68	2,37	-90,56	-1,95	73,21	1,98
0	1,68	0	144,16	3,28	40,64	1,18	31,62	0,73	235,44	4,74	-14,79	-0,41
0	0	-1,68	-82,04	-6,01	-148,44	-12,33	4,67	0,31	145,97	9,16	-105,16	-6,99
0	0	1,68	372,37	5,01	-0,90	-0,01	8,64	0,13	152,91	1,87	1,57	0,03
0	0	0	64,16	1,49	-35,67	-0,97	50,65	1,19	71,44	1,49	-6,79	-0,19
0	0	0	-61,84	-1,48	4,33	0,12	26,65	0,63	47,44	0,99	15,21	0,42
0	0	0	-85,84	-2,06	24,33	0,65	-13,35	-0,32	3,44	0,07	25,21	0,69
0	0	0	-57,84	-1,38	22,33	0,60	-13,35	-0,32	-0,56	-0,01	-20,79	-0,58
0	0	0	182,16	4,11	-17,67	-0,48	-21,35	-0,51	-98,56	-2,13	-0,79	-0,02
Média			236,69	5,13	-20,69	-0,93	60,33	1,56	89,6936	2,25	11,49	0,35

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

3.1.3 Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

A Tabela 20, mostra os tratamentos codificados e os resultados observados nas coletas de dados para os cinco dosadores estudados e o fertilizante mistura granulada. A partir dos dados observados, foram determinados os coeficientes de regressão para as variáveis significativas, como mostra a Tabela 21.

Tabela 20 - Tratamentos codificados, adimensionais, e resultados observados, g min^{-1} , para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.

IL	IT	R	D1	D2	D3	D4	D5
-1	-1	-1	1.830,00	844,00	1.700,00	2.674,00	1.782,00
1	-1	-1	2.140,00	942,00	2.098,00	2.996,00	1.342,00
-1	1	-1	1.916,00	796,00	1.654,00	2.652,00	1.792,00
1	1	-1	2.158,00	986,00	1.980,00	2.776,00	1.324,00
-1	-1	1	4.408,00	2.002,00	3.934,00	5.770,00	3.726,00
1	-1	1	4.918,00	2.322,00	4.524,00	6.420,00	3.024,00
-1	1	1	4.516,00	1.972,00	3.830,00	5.930,00	3.694,00
1	1	1	4.928,00	2.360,00	4.422,00	5.976,00	2.924,00
-1,68	0	0	2.968,00	1.324,00	2.604,00	4.318,00	2.994,00
1,68	0	0	3.606,00	1.656,00	3.374,00	4.864,00	2.012,00
0	-1,68	0	3.288,00	1.550,00	3.004,00	4.282,00	2.434,00
0	1,68	0	3.400,00	1.484,00	2.868,00	4.322,00	2.326,00
0	0	-1,68	1.094,00	460,00	1.044,00	1.500,00	844,00
0	0	1,68	5.570,00	2.618,00	4.936,00	7.090,00	3.922,00
0	0	0	3.356,00	1.496,00	2.986,00	4.382,00	2.418,00
0	0	0	3.314,00	1.520,00	2.994,00	4.406,00	2.434,00
0	0	0	3.324,00	1.498,00	2.978,00	4.404,00	2.436,00
0	0	0	3.378,00	1.526,00	2.960,00	4.458,00	2.422,00
0	0	0	3.342,00	1.530,00	2.956,00	4.498,00	2.440,00
Média (g min^{-1})			3339,68	1520,32	2991,89	4406,21	2436,32

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

De maneira semelhante aos fertilizantes mistura granulada e mistura farelada, cada dosador apresentou peculiaridades quanto a dosagem do fertilizante mistura de grânulos. Porém, os dosadores D1 e D3 apresentaram as mesmas variáveis significativas, com magnitudes diferentes. Como esperado, o efeito da constante e de R foi significativo para todos dosadores. Além destes, foram significativos a todos os efeitos lineares de IL bem como da interação entre IL e R. Isso demonstra que as inclinações longitudinais afetam a taxa de aplicação de fertilizante e esta se altera também em função da velocidade de acionamento. O

dosador mais sensível as variáveis estudadas foi D5, com seis variáveis significativas. Os demais dosadores apresentaram cinco variáveis significativas.

Tabela 21 - Coeficientes de regressão dos modelos matemáticos, reparametrizados e decodificados, para os cinco dosadores estudados e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20.

Dosador	Média	IL	IL ²	IT	IT ²	R	R ²	ILIT	ILR	ITR
D1	-28,33	10,69	*ns	4,59	ns	44,93	ns	ns	0,24	ns
D2	-95,82	-2,81	ns	ns	ns	21,46	ns	0,47	0,27	ns
D3	51,74	13,78	ns	-6,70	ns	38,95	ns	ns	0,29	ns
D4	294,25	61,62	1,36	ns	ns	55,14	ns	ns	-0,51	ns
D5	160,03	-17,98	0,74	-3,60	ns	223,53	ns	ns	-2,67	ns

*ns = Não significativo.

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Quanto ao efeito isolado de IL, a maior magnitude foi a do dosador D4 e menor foi de D2. Em relação a D4, Bonotto (2012) encontrou comportamento ligeiramente diferente pois, em seus experimentos quanto à inclinações longitudinais, o coeficiente de variação para este dosador foi o menor e, manteve-se constante nas três vazões estudadas. Ao analisar a interferência de R, o autor afirma ainda que, para maior parte dos dosadores estudados, o coeficiente de variação diminuiu com o aumento de R. Quando operando em inclinações longitudinais positivas, os dosadores D1, D3 e D4 irão apresentar aumento da taxa de aplicação e diminuição quando operando em inclinações negativas. Os dosadores D2 e D4 apresentaram comportamento contrário. Além do efeito linear de IL, os dosadores D4 e D5 apresentam efeito significativo de inclinações longitudinais quadráticas, IL², ocasionando, para todos valores de IL, aumentos na taxa de aplicação.

Já para a interação entre IL e R esta apresenta maior magnitude para D5 e menor para D1. Para os dosadores D1, D2 e D3, quando IL e R apresentarem sinais iguais, a interação irá ocasionar aumentos na taxa de aplicação, quando apresentarem sinais diferentes, ocorrerá uma

diminuição da taxa de aplicação. Para D4 e D5 o efeito será contrário, pois seus coeficientes de regressão apresentam sinais negativos.

Em relação ao efeito de inclinações transversais, esta apresentou efeito significativo para os dosadores D1, D2, D3 e D4 porém, para D2 seu efeito foi na interação com IL. O efeito de IT linear apresentou maior magnitude para D3 e, da mesma forma que para D5, inclinações transversais negativas promovem aumentos na taxa de aplicação e inclinações positivas reduções, ao contrário de D1. Assim como em relação às inclinações longitudinais, ao analisar inclinações transversais, Bonotto (2012) afirma que D2 foi um dos dosadores que apresentou os coeficientes de variação mais baixos porém, variando entre 0,5 a 2% em função da vazão, sendo maior para vazões mais baixas.

Com base na análise de regressão, Tabela 22, é possível constatar que todos os modelos foram significativos e com percentual de variação explicada, R^2 , superior a 90%. O maior percentual de variação explicada é observado para D1, e o menor para D4.

Tabela 22 - Resumo das análises de regressão para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20 e os cinco dosadores estudados.

Dosador	CV	GL	SQ	QM	F calc	P-valor	R^2
D1	Regressão linear	1	24.902.427,50	24.902.427,50	31.093,87	0,0000	99,95
D2	Regressão linear	1	5.767.392,01	5.767.392,01	10.093,36	0,0000	99,86
D3	Regressão linear	1	19.143.560,05	19.143.560,05	14.218,91	0,0000	99,88
D4	Regressão linear	1	37.257.271,96	37.257.271,96	1.502,93	0,0000	99,82
D5	Regressão linear	1	12.342.731,59	12.342.731,59	12.460,00	0,0000	99,92

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Mesmo os modelos sendo significativos, é importante conhecer o comportamento dos seus erros de ajuste e relativo. A Tabela 23 mostra tais erros e, nenhum dos dosadores apresentou erro relativo médio maior que 10%. Apenas o dosador D4 apresentou erros relativos superiores a esse limite em dois níveis. Para Inclinações longitudinais e transversais iguais a 1, e velocidade de acionamento igual -1 e para IL e IT = 0 e R = -1,68 demonstrando que o modelo possui fragilidade para a predição da taxa de aplicação em baixas velocidades

de acionamento. Outro fato relevante é que os modelos com maior e menor percentual de variação explicada possuem, respectivamente, o menor e maior erro relativo médio.

Tabela 23 – Erros de ajuste, g min^{-1} , e erros relativos, %, para o fertilizante mistura de grânulos 05-20-20 e os cinco dosadores estudados.

IL	IT	R	Erros									
			D1		D2		D3		D4		D5	
			Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo	Ajuste	Relativo
-1	-1	-1	-3,93	0,21	10,47	1,24	19,60	1,15	78,31	2,93	-26,02	-1,46
1	-1	-1	25,41	1,19	25,72	2,73	63,11	3,01	-102,03	-3,41	-16,35	-1,22
-1	1	-1	21,95	1,15	2,47	0,31	61,32	3,71	56,31	2,12	31,10	1,74
1	1	-1	-16,71	0,77	29,72	3,01	32,84	1,66	-322,03	-11,60	12,77	0,96
-1	-1	1	-7,81	0,18	-3,72	-0,19	49,77	1,27	-307,91	-5,34	-25,76	-0,69
1	-1	1	36,53	0,74	23,54	1,01	56,29	1,24	240,75	3,75	3,91	0,13
-1	1	1	40,07	0,89	6,28	0,32	33,49	0,87	-147,91	-2,49	-10,64	-0,29
1	1	1	-13,59	0,28	21,54	0,91	42,01	0,95	-203,25	-3,40	-48,98	-1,68
-1,68	0	0	-60,06	2,02	1,81	0,14	25,00	0,96	-22,48	-0,52	-21,80	-0,73
1,68	0	0	-48,97	1,36	-48,80	-2,95	7,11	0,21	16,43	0,34	-11,48	-0,57
0	-1,68	0	-3,01	0,09	36,50	2,36	-42,63	-1,42	-147,39	-3,44	-34,40	-1,41
0	1,68	0	7,99	0,23	-29,50	-1,99	-31,26	-1,09	-107,39	-2,48	-63,24	-2,72
0	0	-1,68	-1,04	0,09	19,34	4,20	18,45	1,77	-172,74	-11,52	-70,51	-8,35
0	0	1,68	-17,99	0,32	31,67	1,21	15,66	0,32	-96,03	-1,35	-21,12	-0,54
0	0	0	14,49	0,43	-17,50	-1,17	13,05	0,44	-47,39	-1,08	-10,82	-0,45
0	0	0	-27,51	0,83	6,50	0,43	21,05	0,70	-23,39	-0,53	5,18	0,21
0	0	0	-17,51	0,53	-15,50	-1,03	5,05	0,17	-25,39	-0,58	7,18	0,29
0	0	0	36,49	1,08	12,50	0,82	-12,95	-0,44	28,61	0,64	-6,82	-0,28
0	0	0	0,49	0,01	16,50	1,08	-16,95	-0,57	68,61	1,53	11,18	0,46
Média			-1,83	0,65	6,82	0,66	18,95	0,78	-65,0669	-1,92	-15,61	-0,87

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

De forma geral, é possível afirmar que os modelos dos cinco dosadores para o fertilizante mistura de grânulos podem ser utilizados para a predição da taxa de aplicação sem ocasionar erros elevados.

3.2 Simulações

A apresentação dos resultados das simulações foi subdividida por dosador. Tais resultados permitem determinar qual dosador é mais adequado para cada um dos três tipos de fertilizante estudados bem como as inclinações em que seus erros serão minimizados. Através das simulações são determinados também os melhores parâmetros de operação.

3.2.1 Taxas de aplicação máxima e mínima

As taxas de aplicação mínimas e máximas, bem como os valores de IL, IT e R correspondentes foram determinadas através da ferramenta solver, do programa computacional Microsoft Excel 2010. Na Tabela 24, são apresentados os valores determinados.

Analisando a Tabela 24, é possível observar que a maior taxa de aplicação, $10.603,35 \text{ g min}^{-1}$, ocorre para o fertilizante mistura farelada com o dosador D4. Já a menor taxa, $341,08 \text{ g min}^{-1}$, ocorre para o fertilizante mistura de grânulos e dosador D2. A maior taxa, provavelmente se deu com o fertilizante mistura farelada, pois este possui a maior densidade entre os fertilizantes estudados. A menor taxa, provavelmente se deu, pois o fertilizante mistura de grânulos é o que possui o menor ângulo de repouso. Tais informações quanto as propriedades físicas dos fertilizantes podem ser visualizadas na Tabela 8.

Quanto as inclinações longitudinais, para as taxas máximas, todos os valores foram de -11 ou 11° . Para as taxas mínimas, apenas os dosadores D4 e D5 e fertilizante mistura granulada, e os dosadores D3 e D4 e fertilizante mistura farelada apresentaram valores diferentes de -11 e 11° . Para as inclinações transversais, observam-se valores de -11 , 0 e 11° . Apenas na taxa mínima do dosador D2 e fertilizante mistura granulada foi observado o valor de $1,65^\circ$.

Quanto a R, para as taxas máximas todos dosadores e fertilizantes alcançaram sua maior taxa de aplicação na maior velocidade de acionamento estudada, 125 rpm para os dosadores D1, D2, D3 e D4, e $16,93 \text{ rpm}$ para o dosador D5. O comportamento para as taxas mínimas foi o mesmo, 25 rpm para os dosadores D1, D2, D3 e D4, e $3,39 \text{ rpm}$ para D5. Este

fato é observado devido ao tipo de efeito dos modelos matemáticos para cada dosador e tipo de fertilizante, podendo ser linear ou quadrático.

Tabela 24 - Taxas de aplicação máximas e mínimas para os três fertilizantes e cinco dosadores estudados.

Fertilizante mistura granulada 16-16-16								
Dosador	IL (°)	IT (°)	R (rpm)	Taxa máx. (g min ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)	Taxa mín. (g min ⁻¹)
D1	11	*ns	125	5.064,82	-11	ns	25	697,77
D2	11	-11	125	2.788,84	-11	1,65	25	358,11
D3	11	11	125	5.103,20	-11	0	25	711,15
D4	-11	0	125	3.139,00	-6,45	0	25	478,47
D5	-11	0	16,93	3.547,11	10,93	-11	3,39	522,97
Fertilizante mistura farelada 00-15-30								
D1	11	ns	125	7.198,88	-11	ns	25	1.419,31
D2	11	0	125	6.260,27	-11	±11	25	905,76
D3	11	11	125	8.644,20	-7,17	-11	25	1.223,68
D4	11	ns	125	10.603,35	-5,53	ns	25	1.254,25
D5	-11	0	16,93	7.866,47	11	11	3,39	653,66
Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20								
D1	11	ns	125	6.082,49	-11	ns	25	861,56
D2	11	ns	125	2.982,15	-11	ns	25	341,08
D3	11	-11	125	5.549,49	-11	11	25	719,48
D4	-11	ns	125	7.380,13	-11	ns	25	1.300,90
D5	-11	-11	16,93	4.769,25	11	11	3,39	670,90

*ns = Não significativo.

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

3.2.2 Intervalo de inclinações recomendadas à operação

Os intervalos de inclinações recomendados são a ferramenta capaz de expressar com maior qualidade o desempenho de cada dosador e fertilizante. Desta forma, os dosadores que apresentarem os maiores intervalos podem ser considerados de maior desempenho pois, com maiores variações das inclinações de operação, apresentam menores variações da taxa de aplicação.

a) Dosador 1

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16

Inicialmente, para definição do intervalo de inclinações recomendados à operação, é necessário que o modelos matemáticos sejam adaptados para que a unidade de saída da taxa de aplicação de fertilizante seja em kg ha^{-1} . Para isso, é necessário adequar os modelos em função da velocidade de deslocamento do conjunto trator-semeadora e do espaçamento entre as linhas de cultivo, como mostra a Equação 9.

$$Y = (-106,5809 + 17,4190IL + 39,8383R) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (9)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha^{-1} ;

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

R = Rotação de acionamento, rpm.

Fazendo uso da Equação 9, foram determinadas as velocidades de acionamento, Tabela 25, que resultam nas taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para velocidade

de deslocamento simulada de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$, quando IL e IT são iguais a zero.

Tabela 25 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , para o dosador D1, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$.

Taxas de aplicação (kg ha^{-1})	IL ($^{\circ}$)	IT ($^{\circ}$)	R (rpm)
200	0	0	25,2667
300	0	0	36,5623
400	0	0	47,858
500	0	0	59,1537

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Em sequência, para cada dose fixaram-se os valores de R mostrados na Tabela 25 e foram definidos os valores de IL que alteram a taxa de aplicação em valores superiores a 5%. Como as inclinações transversais não foram significativas, a Tabela 26, mostra os intervalos de IL recomendados à operação. Como IL apresentou apenas efeito linear, é possível observar que tanto os limites inferiores quanto superiores possuem o mesmo valor porém, com sinais diferentes. Além disso, como não foi observado efeito na interação com R, para todas doses o erro da taxa de alteração nas inclinações extremas, -11° e 11° , é a mesma $\pm 42,58\text{ kg ha}^{-1}$. Os intervalos recomendados à operação não são iguais devido ao efeito da proporcionalidade do limite de 5% e com isso, para maiores doses os intervalos são maiores.

Tabela 26 - Intervalo de inclinações longitudinais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura granulada 16-16-16.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^{\circ}$)	Limite Superior ($^{\circ}$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-2,5835	2,5835	-42,58	42,58
300	-3,8752	3,8752	-42,58	42,58
400	-5,1669	5,1669	-42,58	42,58
500	-6,4587	6,4587	-42,58	42,58

Na Figura 18, podem ser visualizados, os efeitos de IL sobre a taxa de aplicação. Como IT não foi significativa, todo o seu intervalo, -11 a 11°, é recomendado para a operação, pois este não irá alterar a taxa de aplicação. Com isso, as linhas que definem as diferentes taxas são paralelas ao eixo das IT.

A área hachurada, que representa os valores de inclinações que alteram a dose dentro do limite estabelecido, aumenta para as maiores doses. Como a geração das imagens apresentadas na Figura 18 foi realizada através do programa computacional Autodesk AutoCAD 2008, é possível realizar análises, como por exemplo, medir e comparar áreas. Para cada uma das faixas, que representa alteração de 5kg ha⁻¹ na taxa de aplicação, é possível observar que estas possuem a mesma área para todas as doses. Este fato ocorre pois, as alterações ocasionadas por IL são de efeito linear, não possuem interação com R, ou seja, a mudança da velocidade de acionamento não interfere no seu efeito e, IT não foi significativa.

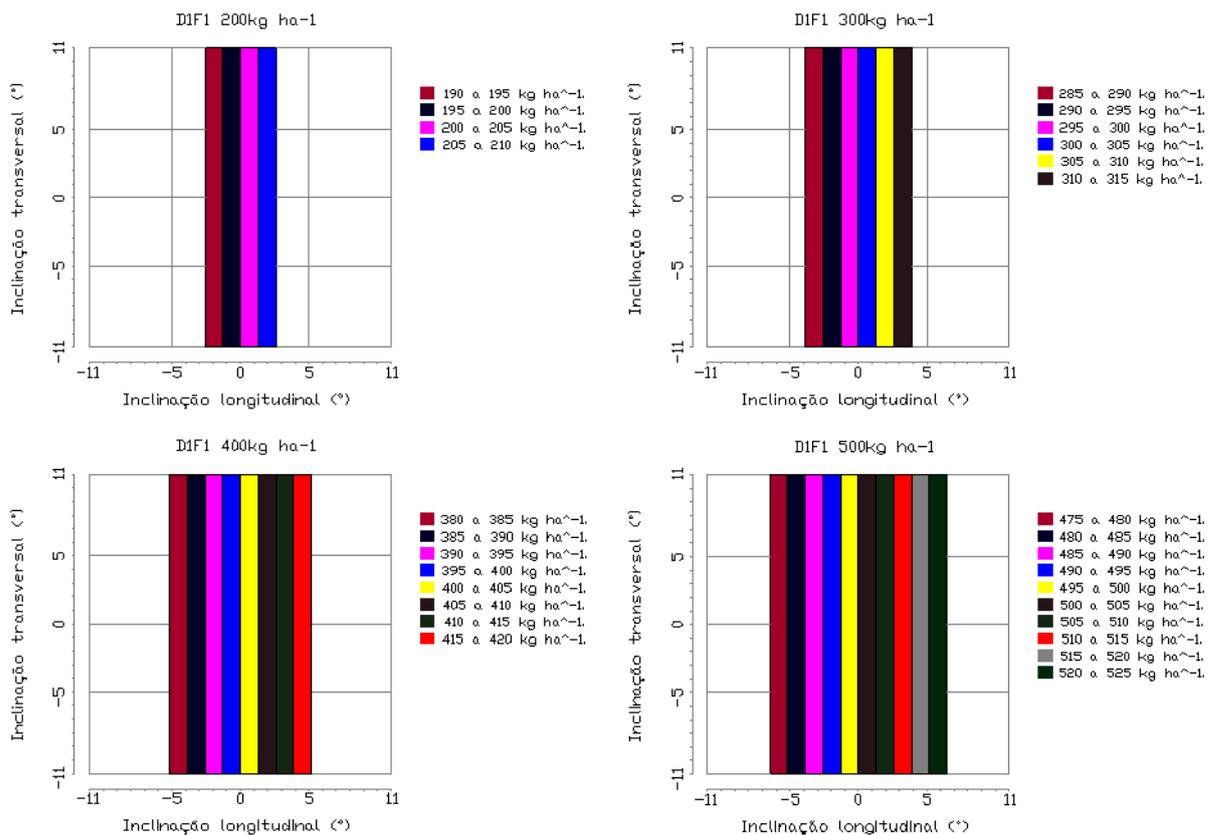


Figura 18 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30

A Equação 10, apresenta o modelo matemático da taxa de aplicação do fertilizante mistura farelada 00-15-30 e dosador D1, adaptado para unidade de saída em Kg ha⁻¹, em função de IL, R, velocidade de deslocamento e espaçamento entre linhas.

Fazendo uso da Equação 10, foram definidas as rotações de acionamento que correspondem as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, como mostra a Tabela 27. Porém, utilizando espaçamento entre linhas de 0,45m e velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹, não foi possível atingir todas as doses pré-estabelecidas sendo então o espaçamento alterado para 0,8m, comum para a cultura do milho.

$$Y = (45,99 + 56,078 R + 0,1041 IL R) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (10)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha⁻¹;

R = Rotação de acionamento, rpm;

IL = Inclinação longitudinal, graus.

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Utilizando os valores de R apresentados na Tabela 27, foram determinados então os limites de inclinações longitudinais apresentados na Tabela 28. É possível observar que o efeito causado por IL não possui magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em valores superiores ao limite estabelecido, com isso, todo o intervalo de IL, -11 a 11°, é recomendado para a operação. O mesmo acontece para IT pois esta não apresentou efeito significativo.

É possível observar também que, para cada dose, a alteração da taxa de aplicação para as inclinações longitudinais de -11 e 11° é a mesma, porém com sinais opostos. Como IL tem efeito na interação com R, para doses diferentes a alteração é diferente, sendo maior para as maiores doses.

Tabela 27 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D1, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	27,7116
300	0	0	41,9775
400	0	0	56,2433
500	0	0	70,5092

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

A Figura 19, apresenta o efeito de IL sobre a taxa de aplicação e nela, é possível observar que as variações ocasionadas por IL são pequenas e, as linhas que representam as alterações na dose são paralela ao eixo das IT, pois essa não apresentou efeito significativo.

Tabela 28 - Intervalo de inclinações longitudinais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura farelada 00-15-30.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	*NA	NA	-3,97	3,97
300	NA	NA	-6,01	6,01
400	NA	NA	-8,05	8,05
500	NA	NA	-10,09	10,09

*NA = Não apresenta.

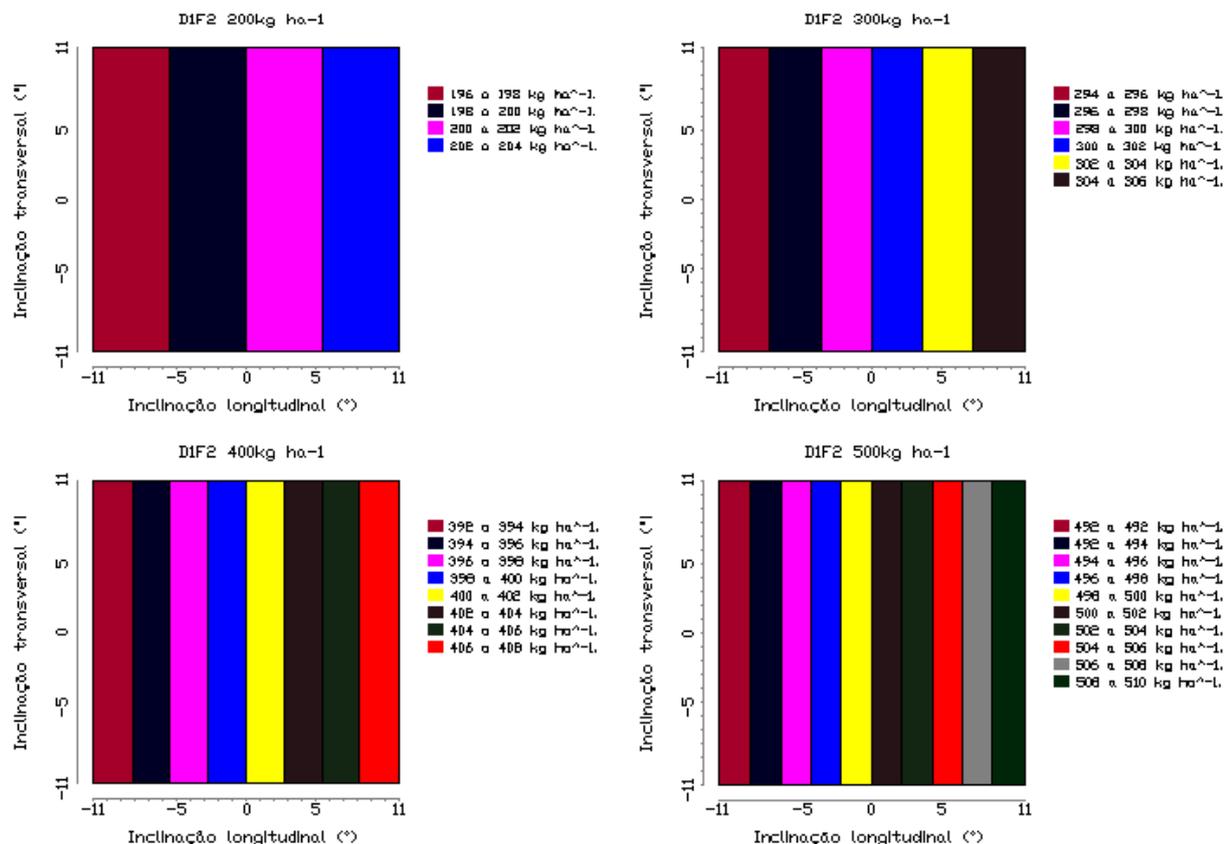


Figura 19 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Outro fator importante na Figura 19 é que as variações são menores para as doses menores. Na dose de 200kg ha⁻¹, por exemplo, observa-se que as faixas que representam alterações de 2kg ha⁻¹ possuem maior área se comparadas as demais doses. Isso ocorre pois o efeito de IL se deu na interação com R, logo quanto maior o valor de R (maiores doses) maior será o efeito de IL. Contudo, para todas as doses o intervalo recomendado à operação é o mesmo sendo que, o maior desempenho do dosador será nas menores doses.

iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

Assim como realizado para os fertilizantes mistura granulada e mistura farelada, ao operar com o dosador D1, a Equação 11, define a taxa de aplicação do fertilizante mistura de grânulos 05-20-20 para que sua unidade de saída seja em kg ha^{-1} .

$$Y = (28,3316 + 10,6948 \text{ IL} + 4,59 \text{ IT} + 44,9312 \text{ R} + 0,2373 \text{ IL R}) * \left(\frac{6}{10 * V * E} \right) \quad (11)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min^{-1} .

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Diferente do observado para os demais fertilizantes e dosador D1, o efeito das inclinações transversais foi significativo o que, de certa forma poderá fazer com que ocorram situações em que, devido ao efeito combinado de IL e IT, o intervalo de inclinações recomendado a operação aumente, ou diminua. Analisando a Equação 11 observa-se que tanto IL quanto IT apresentam coeficientes de regressão com sinal positivo. Com isso, se forem simulados valores positivos para IL e negativos para IT, o intervalo de inclinações será aumentado em relação à quanto IT possui valor zero. Em caso contrário, quando IL for negativa e IT positiva, o efeito será de diminuição.

Porém, para avaliar tais efeitos, é necessário determinar a influência isolada de IL e IT e para posterior determinação da influência combinada de ambas. Logo, é necessário determinar as velocidades de acionamento que representam as doses de 200, 300, 400 e 500 kg ha^{-1} , como mostra a Tabela 29.

Tabela 29 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	36,2406
300	0	0	54,0456
400	0	0	71,8506
500	0	0	89,6556

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Fazendo uso dos valores de velocidades de acionamento, Tabela 29, e da Equação 11, foram determinados os valores de IL e IT, separadamente, que alteram a taxa de aplicação em valores superiores a 5%. Também foram determinados os erros da taxa de aplicação nas maiores inclinações, -11 e 11°, como mostram as Tabela 30 e Tabela 31.

Tabela 30 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-4,1463	4,1463	-26,53	26,53
300	-5,1022	5,1022	-32,34	32,34
400	-5,7670	5,7670	-38,15	38,15
500	-6,2559	6,2559	-43,96	43,96

Analisando a Tabela 30 é possível observar que, diferente do que ocorre para o fertilizante 2 e semelhante ao fertilizante 1, o efeito de IL possui magnitude capaz de alterar a dose em ±5% e que, devido a interação de IL com R a variação nos extremos não é igual para todas doses. Logo, cada uma apresenta seus limites específicos e, quanto maior, maior o intervalo recomendado à operação.

Tabela 31 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D1, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	NA*	NA	-6,31	6,31
300	NA	NA	-6,31	6,31
400	NA	NA	-6,31	6,31
500	NA	NA	-6,31	6,31

* - Não apresenta.

Quanto a IT, na Tabela 31 é possível observar que esta, isoladamente, não possui magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em $\pm 5\%$. Além disso, como IT não apresentou interação com as demais variáveis, o erro gerado é igual, independente da dose, atingindo seu valor máximo em $\pm 11^\circ$. Mesmo assim, a operação do dosador em relação a IT é recomendada para todo intervalo estudado, ou seja, de -11 a 11°, como pode ser visualizado na Figura 20.

Contudo, é pouco provável que quando a semeadora-adubadora estiver em operação, esta seja submetida a condições de efeito isolado de IL ou IT, faz-se necessário conhecer os efeitos combinados de IL e IT sobre a taxa de aplicação, como mostra a Figura 20. É possível observar que com o aumento da dose ocorre o aumento do intervalo recomendado. Observado a Tabela 32 é possível constatar que, a dose de 500kg ha⁻¹, por exemplo, possui a área correspondente ao intervalo recomendado para a operação cerca de 1,5 vezes maior que a área da dose de 200kg ha⁻¹.

Ao longo de todo eixo de IT, ou seja para todos os valores de -11 a 11°, o intervalo de IL permanece com o mesmo tamanho, sendo apenas deslocado de posição. Por exemplo, se quando IT é igual a zero, o intervalo de IL corresponde a um valor X, para qualquer valor de IT, como -11°, o intervalo de IL permanecerá sendo X. Com isso, o resultado esperado de que inclinações transversais, com sinal oposto ao de inclinações longitudinais, iriam ampliar o intervalo de inclinações longitudinais, não é confirmado.

De maneira geral, o comportamento da taxa de aplicação é semelhante para todas as doses. Contudo, nas menores doses para que a taxa de aplicação seja alterada é necessária maior alteração das inclinações de trabalho. Para a dose de 200kg ha⁻¹, com um valor fixo de IT, a cada 2,07° de IL alteram a taxa de aplicação em 5kg ha⁻¹ e, com um valor fixo de IL,

essa alteração se dá a cada $8,71^\circ$ de IT. Já para a dose de 500kg ha^{-1} , são necessários que se alterem $1,25^\circ$ de IL ou $8,71^\circ$ de IT para obter a mesma alteração da taxa de aplicação. Isso ocorre, pois para maiores doses é preciso maiores velocidades de acionamento que apresentam interação com IL aumentando seu efeito. Para IT, que apresenta apenas efeito linear, sem interações, observa-se que a variação é a mesma, $8,71^\circ$.

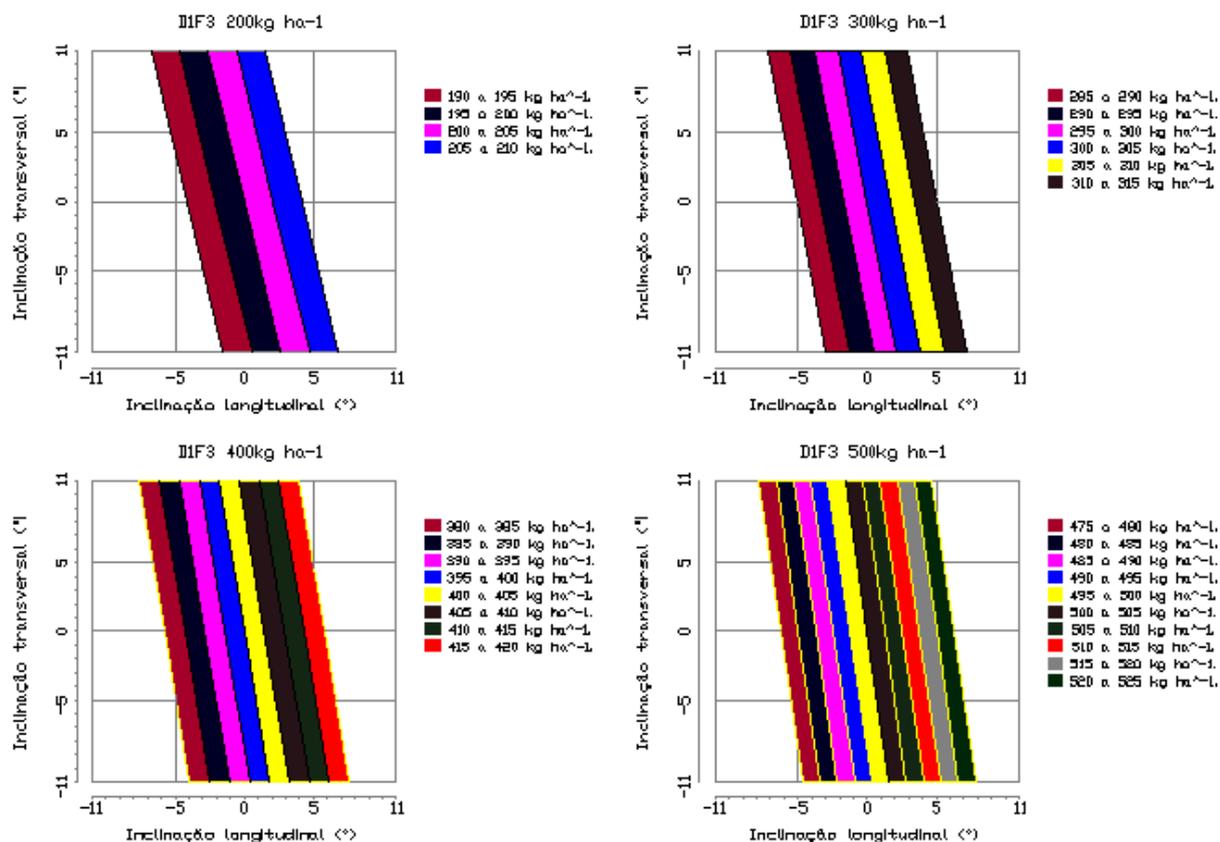


Figura 20 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h^{-1} e espaçamento de $0,8\text{m}$.

A Tabela 32 mostra as áreas, em unidades², correspondentes aos intervalos de inclinação recomendados para a operação com o dosador D1. É possível afirmar que o dosador apresenta melhor desempenho na aplicação do fertilizante mistura farelada 16-16-16 pois foi o de maior área.

Na Tabela 32 é possível observar ainda que a área correspondente ao intervalo recomendado para a dose de 500kg ha^{-1} é aproximadamente 2,5 vezes maior que a área para a

dose de 200kg ha⁻¹. Essa diferença é justificada, pois para a dose de 200kg ha⁻¹, o limite de erro máximo é de apenas ± 10 kg, enquanto para a dose de 500kg ha⁻¹ esse limite é de ± 25 kg.

Tabela 32- Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D1 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média
	200	300	400	500	
Mistura granulada	113,67	170,51	227,34	283,86	198,85
Mistura farelada	484,00	484,00	484,00	484,00	484,00
Mistura de Grânulos	182,43	224,49	253,75	275,26	233,98
Média	260,03	293,00	321,70	347,71	305,61

Em média, o aumento da dose propiciou o aumento da área sendo seu desempenho mais elevado na dose de 500kg ha⁻¹. Apesar disso, para todos fertilizantes foi observado que em maiores doses menores alterações das inclinações de trabalho alteram com maior magnitude a taxa de aplicação do que em doses menores. Na média geral dos tipos de fertilizante e doses, o dosador D1 apresentou um intervalo de inclinações recomendadas à operação corresponde a 63,14% do intervalo total possível.

b) Dosador 2

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16

Assim como foi realizado para o dosador D1, é necessário inicialmente adequar seu modelo matemático para que a unidade de saída seja em kg ha⁻¹, como mostra a Equação 12.

Como IL e IT foram significativas, é necessário inicialmente definir os intervalos de inclinações para o efeito isolado de cada uma. A Tabela 33 apresenta os valores de R, nos quais considerando IL e IT zero, a taxa de aplicação resulta em 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, para velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

$$Y = (-19,7334 + 2,9255IL + 1,2545IT + 0,3498IT^2 + 18,6818R + 0,2039ILR - 0,0962ITR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (12)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min⁻¹;

V = Velocidade de deslocamento, km h⁻¹;

E = Espaçamento, m.

Tabela 33 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	49,2314
300	0	0	73,3191
400	0	0	97,4067
500	0	0	121,4944

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Com base nas rotações, apresentadas na Tabela 33, foram definidos os limites de IL que ocasionam variações de 5% na taxa de aplicação, quando IT é igual a zero, conforme Tabela 34.

Na Tabela 34 é possível observar que, como o efeito da interação entre IL e R foi significativo, para cada dose os limites são diferentes, bem como as variações da taxa de aplicação nos extremos -11 e 11°. Apesar de com o aumento das doses ocorrer um aumento do intervalo de inclinações, a variação nos extremos, proporcionalmente a dose desejada, diminui. Além disso, como a Equação 12 é de efeito linear, para os extremos de -11 e 11°, em cada dose, a variação é igual.

Tabela 34 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-3,4632	3,4632	-31,76	31,76
300	-3,7699	3,7699	-43,77	43,77
400	-3,9445	3,9445	-55,77	55,77
500	-4,0574	4,0574	-67,78	67,78

Já o comportamento quanto a IT, apresentado na Tabela 35, foi ligeiramente diferente. Não foram observados limites inferiores, ou seja, nenhum valor de IT entre $-11 \leq IT \leq 11^\circ$ resultou em doses 5% inferiores à referência. Isso ocorre devido ao fato de IT² ser significativo e positivo, desta forma todos valores de IT irão contribuir com aumento da taxa de aplicação. Além disso, é possível observar que as variações das doses nos extremos foram diferentes tanto entre as doses, devido ao efeito da interação entre IT e R, quanto para os extremos -11 e 11°, devido ao efeito de IT².

Tabela 35 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	NA*	-7,4096	17,92	0,89
300	NA	-7,9020	23,58	-4,77
400	NA	-8,2936	29,24	-10,43
500	NA	-8,3954	34,91	-16,1

* Não apresenta

O comportamento da taxa de aplicação sob o efeito combinado de IL e IT é apresentado na Figura 21. Em todas as doses, como mostra a Figura 21, é possível observar que para todos os valores de IT, o intervalo de IL possui o mesmo tamanho alterando-se

apenas os valores dos limites inferiores e superiores. Ou seja, se subtrairmos o limite inferior do limite superior, o resultado será sempre o mesmo para todos valores de IT. Constatando assim que IT interfere na posição do intervalo de IL mas não em sua magnitude.

Cada cor nas imagens da Figura 21, expressa variações na taxa de aplicação da ordem de 5kg ha^{-1} . As faixas correspondentes a tais variações possuem a mesma área, ou seja, a variação é constante e, utilizando como exemplo a dose de 400kg ha^{-1} , para que a taxa de aplicação seja alterada em 5kg ha^{-1} , para um mesmo valor de IT, é necessário uma alteração de $0,9973^\circ$ em IL.

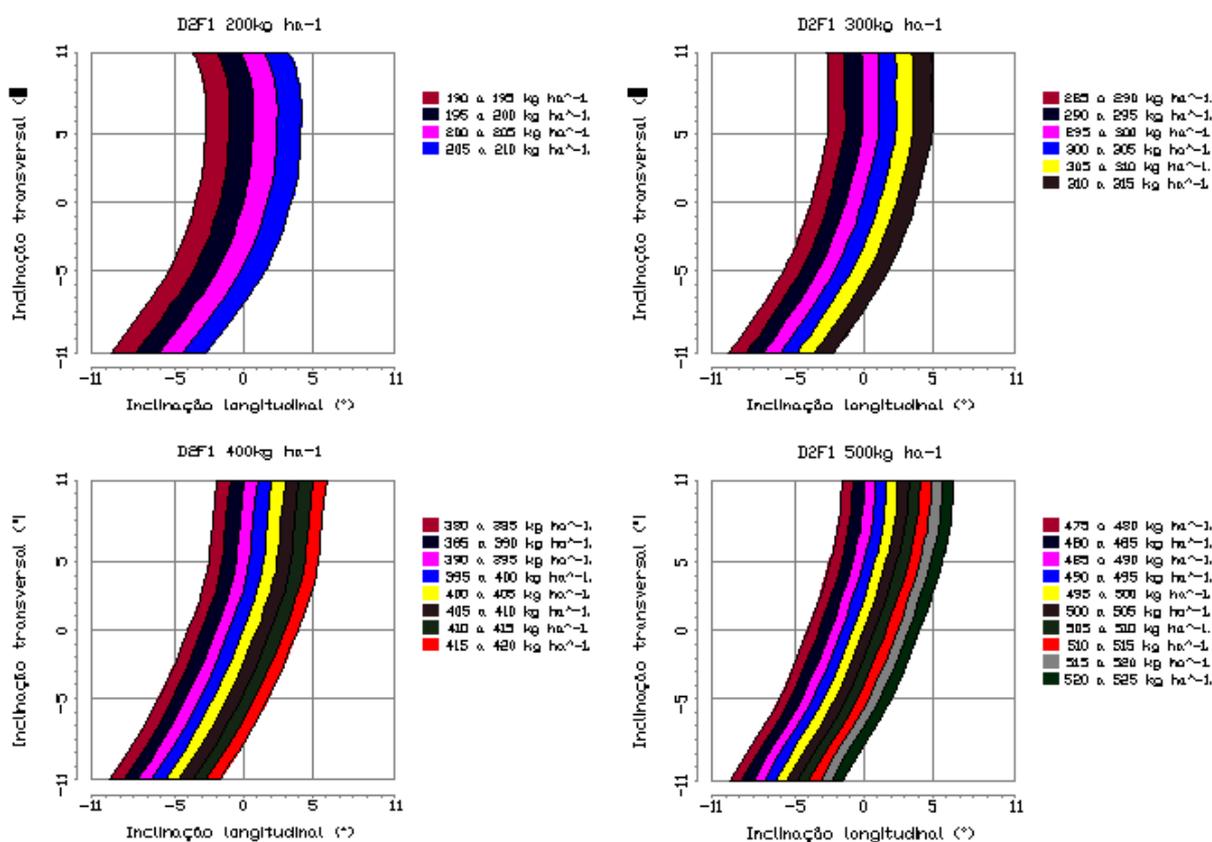


Figura 21 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$.

Outro fator que pode ser observado, evidenciado na dose de 300kg ha^{-1} , é que com o aumento das dose, e conseqüente aumento da velocidade de acionamento, R, para valores de IT positivos as curvas apresentam comportamento praticamente paralelo ao eixo vertical, eixo

de IT. Este fato ocorre devido ao efeito da interação de IT com R e também pois, quando IT é positiva, tanto o efeito linear quanto quadrático, IT e IT², contribuem para o aumento da taxa de aplicação. Para valores de IT negativos, as curvas mostram-se mais acentuadas, efeito este ocasionado pela porção quadrática de IT que contribui para o aumento da taxa de aplicação, enquanto a porção linear contribui para redução.

Independente da dose, o comportamento dos intervalos de inclinações é semelhante. Para maiores doses, os intervalos são maiores, devido principalmente a proporcionalidade dos limites. Se comparados os intervalos recomendados para as doses de 500 e 200kg ha⁻¹, a área correspondente para a dose de 500kg ha⁻¹ é aproximadamente 1,2 vezes maior.

ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30

O primeiro passo para a determinação dos intervalos de inclinações é a alteração do modelo para que a unidade de saída seja kg ha⁻¹, de acordo com a Equação 13.

$$Y = (175,711 - 7,0472IL - 1,2671L^2 - 2,4979IT^2 + 47,0664R + 0,3142ILR) * \left(\frac{6}{10 * V * E} \right) \quad (13)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min⁻¹.

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m;

Como pode ser visualizado na Equação 13, a taxa de aplicação de fertilizantes é função de três variáveis, IL, IT e R. Devido a isso, é importante conhecer os efeitos isolados de IL e IT bem como o efeito combinado das mesmas e da interação entre IL e R. A Tabela 36 mostra os valores de R que resultam nas taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ quando IL e IT são zero.

Tabela 36 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,8m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	30,2612
300	0	0	47,2585
400	0	0	64,2558
500	0	0	81,2531

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Fixando os valores de R apresentados na Tabela 36, foram definidos os intervalos de inclinações longitudinais e transversais nos quais a variação da taxa de aplicação é inferior a $\pm 5\%$. Na Tabela 37, por exemplo, é possível observar que devido ao efeito quadrático de IL, esta apresentou, na dose de 200kg ha⁻¹, dois valores que caracterizam limites inferiores, um positivo e um negativo. Apesar de o mesmo efeito ocorrer para as demais doses, nestas observa-se apenas um limite inferior negativo. Isso ocorre devido ao efeito da proporcionalidade, que para doses maiores permite variações maiores, e ao efeito da interação entre IL e R, nas quais os valores de R são maiores. Ao assumir valores positivos para IL, o seu efeito isolado e quadrático, IL e IL², fazem com que a dose seja diminuída enquanto a interação com R ocasiona um aumento, não permitindo que a variação atinja -5% da dose de referência.

Além disso, como o efeito linear de IL apresenta sinal negativo, quando IL será negativo, ocorrerá um aumento da dose e quando IL será positivo irá ocorrer uma diminuição da dose. Quanto ao efeito quadrático, IL², como este apresenta sinal negativo, independente de IL assumir valores positivos ou negativos, irá ocorrer uma diminuição da dose. É possível observar que a variação da dose nos extremos, é diferente para cada dose bem como para -11° e 11°. Para os limites superiores, +5% da dose de referência, os efeitos de IL, IL² e ILR não apresentaram magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação acima do limite.

Tabela 37 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-7,0355 8,9784	NA*	-22,54	-15,77
300	-7,1296	NA*	-29,88	-8,43
400	-7,1765	NA*	-37,23	-1,09
500	-7,0936	NA*	-44,57	6,26

* - Não apresenta.

A Tabela 38 mostra os limites recomendados para IT. Esta, que apresentou apenas efeito quadrático significativo, com sinal negativo, para todos valores entre -11 e 11°, diferentes de 0, irá resultar em reduções da taxa de aplicação. Logo, é possível observar que foram encontrados apenas limites inferiores. E, devido ao efeito quadrático, para cada dose foram encontrados dois limites, que possuem o mesmo valor, porém com sinais opostos. Além disso, como IT não apresentou interação com R, o desvios nos extremos foram iguais para todas doses bem como para -11 e 11°.

Tabela 38 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-5,6044 5,6044	NA*	-37,78	-37,78
300	-7,0009 7,0009	NA	-37,78	-37,78
400	-8,0034 8,0034	NA	-37,78	-37,78
500	-8,9481 8,9481	NA	-37,78	-37,78

* - Não apresenta.

Tanto IL quanto IT apresentaram apenas limites inferiores, ou seja, a taxa de aplicação não será aumentada em mais de 5% para nenhuma dose. O que não significa por exemplo que será recomendada a restrição do uso do dosador apenas para valores positivos ou negativos de IL e IT. Quando se analisa o efeito combinado de IL e IT, como mostra a Figura 22, é possível observar que para a dose de 200kg ha^{-1} , por exemplo, são determinados 4 limites específicos, +IL e -IL, +IT e -IT, todos inferiores, fazendo com que os limites criem uma forma geométrica semelhante a uma elipse, diferente do observado para os demais dosadores e fertilizantes. Para os demais dosadores, a magnitude das variações ocasionadas permitia que os desvios gerados por IL fossem ajustados por IT, e vice e versa, garantindo que para todo o intervalo de IT fosse recomendada a utilização do mecanismo dosador para o tipo de fertilizante em questão. Este fato provavelmente ocorra devido ao tipo de descarga de fertilizante do dosador D2, a descarga por transbordo lateral.

Porém, com aumento da dose e consequente aumento da velocidade de acionamento, R, e também do efeito da proporcionalidade dos limites, é possível observar um aumento do intervalo de operação recomendado, como pode ser visualizado nas doses de 300, 400 e 500kg ha^{-1} .

Quanto mais afasta-se do ponto 0° IL e 0° IT, menores são as doses, ou seja, a medida que se simulam inclinações diferentes de 0° , tanto para IL quanto para IT, em qualquer sentido, ocorrem reduções da taxa de aplicação. Na dose de 400kg ha^{-1} , por exemplo, a medida que a distancia do ponto zero aumenta, maiores ficam as elipses, até que as formas geométricas deixam de ser elipses pois, dependendo do valor de IT, o intervalo de IL atinge 11° .

Já para a dose de 500kg ha^{-1} , é possível observar que para nenhuma das variações da taxa de aplicação a forma geométrica é a de uma elipse, apesar de apresentar comportamento semelhante ao de uma. Outro fator importante a ser observado é que, com o aumento da dose, ocorre um aumento significativo da área correspondente ao intervalo de inclinações. Porém para as menores doses, observa-se que as faixas que correspondem a alteração de 5kg ha^{-1} , possuem maior área se comparadas as maiores doses. Ou seja, para que se obtenha a mesma alteração, nas menores doses, são necessárias maiores alterações de IL para que se obtenha a mesma modificação das maiores.

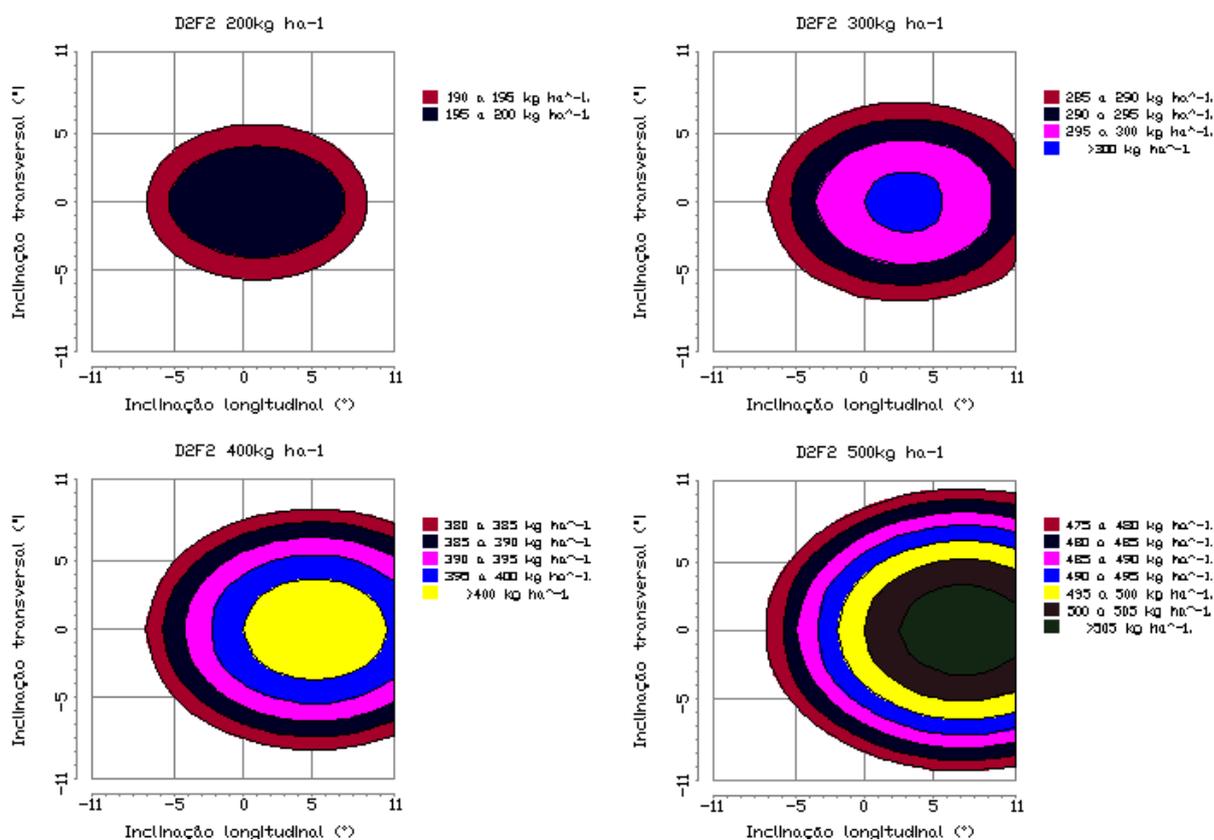


Figura 22 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

De maneira geral, o melhor desempenho do dosador é obtido na dose de 500kg ha⁻¹, pois a área correspondente ao intervalo de inclinações recomendadas à operação, conforme a Tabela 41, é aproximadamente 2,2 vezes maior que a área da dose de 200kg ha⁻¹. Contudo, o efeito das inclinações é menos significativo para as menores doses. Na dose de 200kg ha⁻¹, por exemplo, para um valor fixo de IT, são necessários 1,6° de IL para que a taxa de aplicação seja alterada em 5kg ha⁻¹. Para a mesma variação na dose de 500kg ha⁻¹, são necessários 1,20° de IL. Ou seja, para as maiores doses o intervalo recomendado é maior, mas nas menores doses a taxa de aplicação é mais precisa.

iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

Para definição do intervalo de inclinações, é necessário inicialmente adequar o modelo para que a unidade de saída seja kg ha^{-1} , conforme a Equação 14.

Fazendo uso da Equação 14, e considerando IL e IT zero, foram definidas as velocidades de acionamento que correspondem as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , para velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m, conforme Tabela 39.

$$Y = (-95,8153 - 2,8111IL + 21,4575R + 0,4662ILIT + 0,2693ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (14)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min^{-1} ;

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Tabela 39 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para o dosador D2, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,45m.

Taxas de aplicação (kg ha^{-1})	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	46,4087
300	0	0	67,3804
400	0	0	88,3521
500	0	0	109,3239

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

A Tabela 40 mostra os intervalos de inclinações recomendados para operação quando IT é considerada zero. Como IL apresentou efeito significativo linear e na interação com R, é

possível observar que, para todas doses, os limites inferiores e superiores são iguais, apenas com sinais diferentes.

Outro fator importante a ressaltar é que, diferente do que aconteceu com os demais dosadores e tipos de fertilizantes, com o aumento das doses, e consequente aumento da velocidade de acionamento, R, ocorre a diminuição do intervalo de inclinações, passando de $\pm 4,6455$ na dose de 200kg ha^{-1} , para $\pm 4,2246$ na dose de 500kg ha^{-1} , representando redução de 9,06%. Além disso, os desvios da taxa de aplicação nos extremos, para cada dose, possuem o mesmo valor para $\pm 11^\circ$ porém, quando IL é negativa o erro é negativo e quando IL é positiva, o erro é positivo.

Tabela 40 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D2, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-4,6455	4,6456	-23,68	23,68
300	-4,4019	4,4019	-37,48	37,48
400	-4,2893	4,2894	-51,29	51,29
500	-4,2246	4,2246	-65,09	65,09

Como IT foi significativa apenas na interação com IL, não é possível determinar seus limites de forma isolado, pois se for atribuído o valor zero para IL, o efeito de IT será nulo. Logo, para que seja observado o efeito de IT é necessário que se associem valores de IL e IT, como mostra a Figura 23.

Apesar de não ter efeito isolado, o efeito de IT causa variações consideráveis na taxa de aplicação. Na dose de 200kg ha^{-1} , por exemplo, ao analisar as linhas horizontais que correspondem aos valores de IT de 0° e -11° observa-se que ocorreu um aumento de 112,49% no intervalo de IL recomendado para a operação. Porém, se forem comparadas as linhas correspondentes aos valores de IT de 0° e 11° , observa-se uma redução de 34,61% no intervalo de inclinações. Evidenciando assim, que ITs positivas reduzem o intervalo de inclinações longitudinais recomendadas à operação enquanto ITs negativas aumentam. Mas, apesar disso, as inclinações transversais não possuem magnitude para alterar a taxa de aplicação em $\pm 5\%$, sendo todo o seu intervalo estudado, -11 a 11° , recomendado para operação.

Outro fator importante, que pode ser visualizado na Figura 23, e já mencionado anteriormente, é de que o aumento das doses reduz o intervalo de inclinações recomendado. Além disso, com o aumento das doses, o efeito de IT sobre o intervalo de IL passa a ser menos expressivo e, na dose de 500kg ha⁻¹, por exemplo, analisando valores de inclinação transversal de 0° e -11°, ocorre um aumento de 23,84%, e analisando os valores de 0° e 11° a redução no intervalo de IL é de 16,15%.

Para determinar com que fertilizante o dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral obtém melhor desempenho, foram comparadas as áreas formadas pelos limites de inclinações longitudinais e transversais, Tabela 41. O melhor desempenho do dosador foi dependente da dose aplicada, sendo mais eficiente na aplicação do fertilizante em mistura farelada na dose de 500kg ha⁻¹.

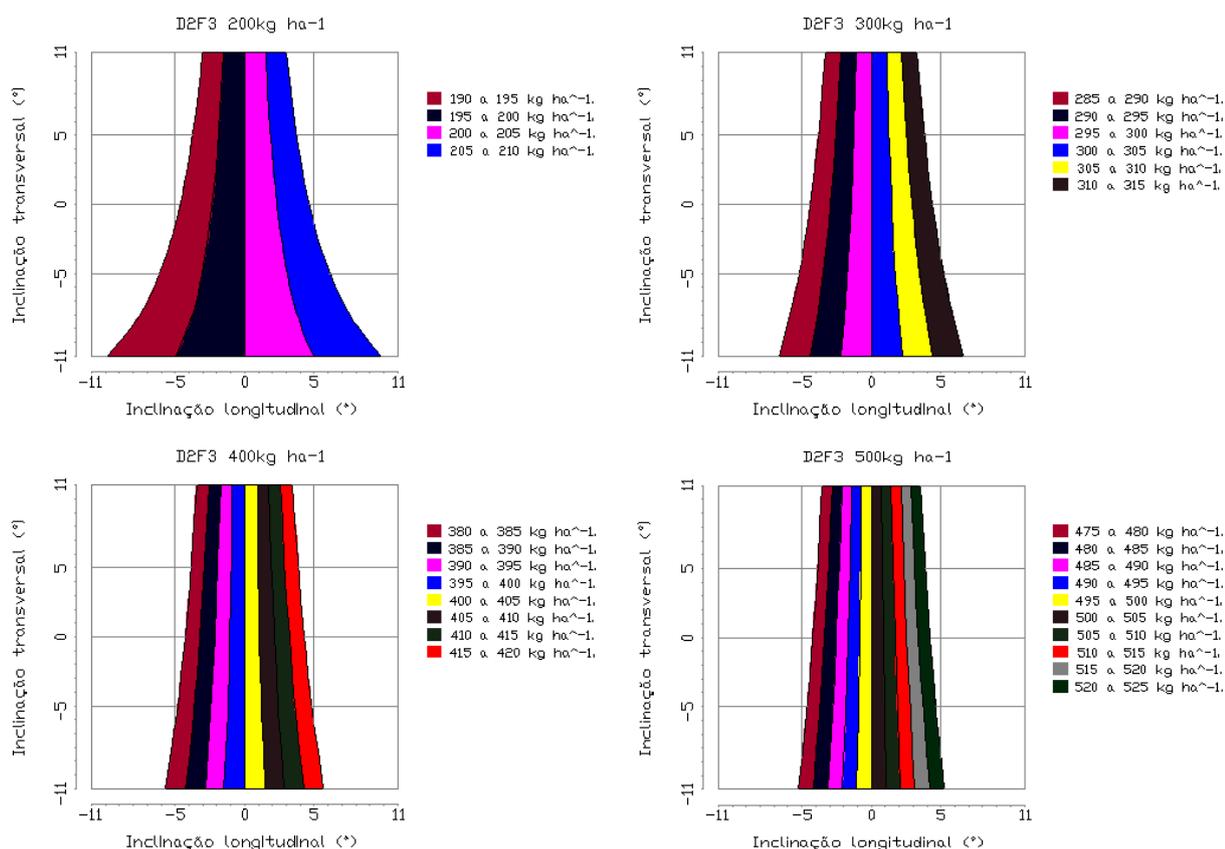


Figura 23 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

As propriedades físicas do fertilizante alteram a qualidade da sua distribuição e, para o dosador D2, em média, quanto ao tipo de fertilizante, o melhor desempenho foi obtido para o fertilizante mistura farelada. Em relação a dose, o melhor desempenho foi obtido para a dose de 500kg ha⁻¹, exceto para o fertilizante mistura de grânulos, que apresentou melhor desempenho na dose de 200kg ha⁻¹. Na média geral dos tipos de fertilizante e doses, o dosador D2 apresenta um intervalo de inclinações recomendadas à operação corresponde a 41,75% do intervalo total possível.

Tabela 41 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D2 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média (kg ha ⁻¹)
	200	300	400	500	
Mistura granulada	152,55	166,77	175,52	178,65	168,37
Mistura farelada	143,08	218,25	268,28	311,33	235,24
Mistura de Grânulos	227,75	201,73	192,75	188,30	202,63
Média (kg ha ⁻¹)	174,46	195,58	212,18	226,09	202,08

c) Dosador 3

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16

A Equação 15 apresenta o modelo matemático do dosador D3, do tipo helicoidal com descarga por gravidade, e fertilizante mistura granulada, no qual a unidade de saída é kg ha⁻¹.

Fazendo uso da Equação 15, e considerando IL e IT zero, foram definidas as velocidades de acionamento que correspondem as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, para velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m, conforme Tabela 42.

$$Y = (-25,8929 + 4,7282IL + 1,1628IT^2 + 35,5267R + 0,3604ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (15)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min⁻¹;

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Tabela 42 - Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	26,0619
300	0	0	38,7284
400	0	0	51,3949
500	0	0	64,0615

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

A partir dos valores apresentados na Tabela 42, foram determinados os valores de IL, Tabela 43, e de IT, Tabela 44, que representam os intervalos de inclinações recomendados à operação. Como IL apresentou efeito linear e na interação com R, é possível observar que para a mesma dose, o erro nos extremos é o mesmo, porém com sinais opostos. O aumento das doses propiciou o aumento do intervalo de inclinações bem como, devido ao efeito da interação com R, o aumento dos erros nos extremos -11 e 11°.

Tabela 43 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-3,1868	3,1868	-34,52	34,52
300	-3,6124	3,6124	-45,68	45,68
400	-3,8709	3,8709	-56,84	56,84
500	-4,0444	4,0445	-67,99	67,99

Para IT, como esta apresentou apenas efeito quadrático, IT², com coeficiente de regressão positivo, qualquer valor irá resultar em aumentos da taxa de aplicação, logo, como mostra a Tabela 44, não foram encontrados valores para limites inferiores. Contudo, devido ao efeito quadrático, foram encontrados dois valores de limites superiores para cada dose, com o mesmo valor e sinais opostos.

Além disso, o aumento da dose propiciou aumento do intervalo de inclinações. Os erros nos extremos são iguais, tanto para os valores de -11 e 11° como para as diferentes doses.

Tabela 44 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	NA*	-6,2209	31,27	31,27
	NA	6,2209		
300	NA	-7,6190	31,27	31,27
	NA	7,6190		
400	NA	-8,7978	31,27	31,27
	NA	8,7978		
500	NA	-9,8361	31,27	31,27
	NA	9,8361		

*NA = Não apresenta.

A Figura 24 mostra o efeito combinado das inclinações longitudinais e transversais sobre a taxa de aplicação. É possível observar que o aumento das doses propiciou aumento no intervalo de inclinações. O intervalo de IL não possui sua magnitude alterada pelas inclinações transversais, estas fazem apenas com que o intervalo de inclinações longitudinais seja deslocado. Esse deslocamento faz com que as faixas, que correspondem a alterações na taxa de aplicação de 5kg ha^{-1} , tenham formato de curvas.

Utilizando como exemplo a dose de 400kg ha^{-1} , observa-se que o intervalo de IL, quando IT é igual a zero, é de $-3,8709^\circ$ a $3,8709^\circ$ e quando IT é igual a -11° ou 11° , este intervalo vai de $-9,9531^\circ$ a $-2,2113^\circ$. Se for subtraído o limite inferior do limite superior, o resultado será o mesmo $7,7418^\circ$, comprovando assim que os limites apenas se deslocam, sem ter sua magnitude alterada.

Comparando a alteração necessária de IL, para um valor fixo de IT, para que a taxa de aplicação seja alterada em 5kg ha^{-1} , na dose de 200kg ha^{-1} são necessários $1,6^\circ$ enquanto para a dose de 500kg ha^{-1} são necessários $0,81^\circ$, ou seja, praticamente 50% a menos. Isso demonstra que, apesar do aumento da dose propiciar o aumento do intervalo de inclinações recomendado à operação, como mostra a Tabela 51, para as menores doses, a precisão é maior.

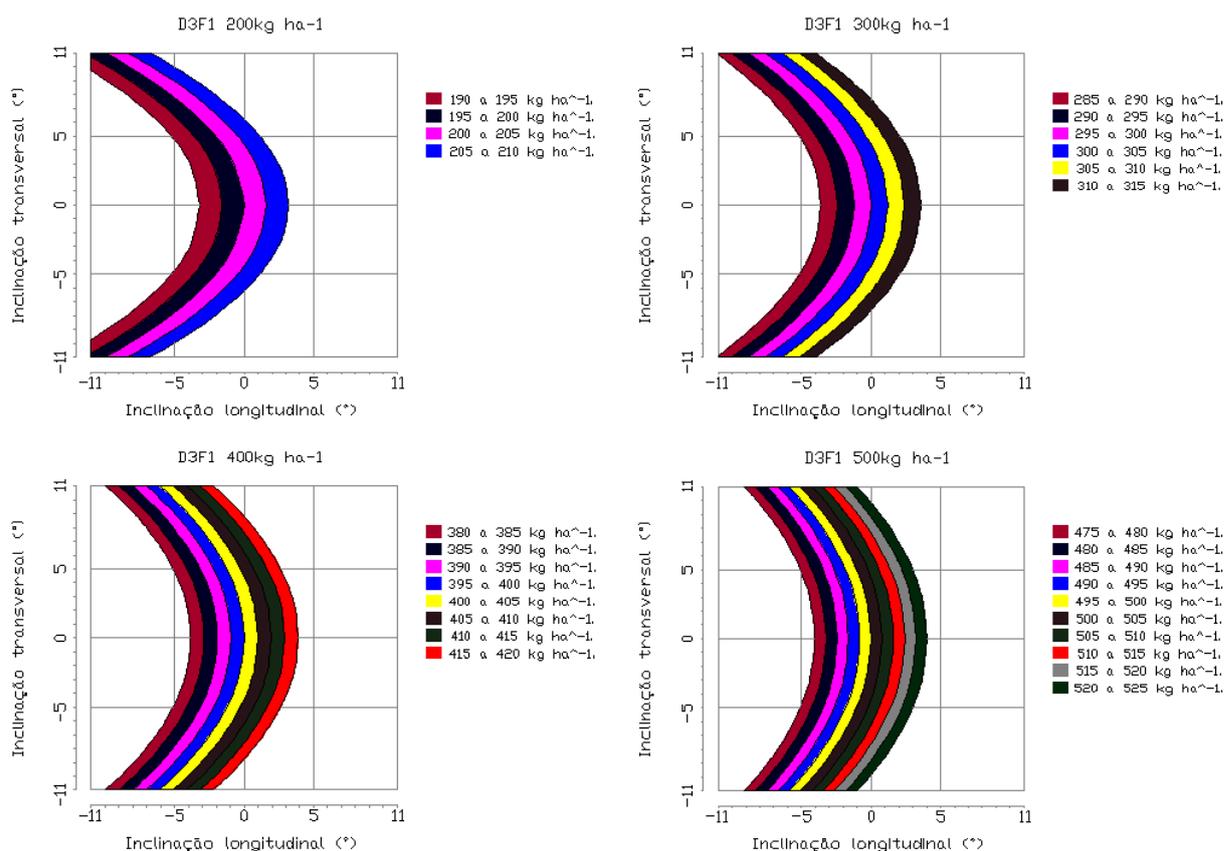


Figura 24 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30

Para determinação do intervalo de inclinações recomendados à operação, inicialmente o modelo matemático do dosador D3 e fertilizante mistura farelada, foi adequado para que a unidade de saída seja kg ha⁻¹, como mostra a Equação 16.

A partir da Equação 16, considerando IL e IT iguais a zero, foram determinadas as velocidades de acionamento que correspondem as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, como mostra a Tabela 45.

$$Y = (180,1371 + 40,0966IL + 3,7437IL^2 + 9,7276IT + 53,7223R + 0,5438ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (16)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min⁻¹;

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Tabela 45 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	26,4297
300	0	0	41,3211
400	0	0	56,2125
500	0	0	71,1039

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Utilizando as velocidades de acionamento da Tabela 45, foram determinados então, para o efeito isolado de IL e IT, os limites de inclinações longitudinais, Tabela 46, e transversais, Tabela 47, recomendados à operação.

Para IL, é possível observar que esta possui magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em valores superiores ao limite estabelecido para todas as doses. Como foram significativos seus efeitos linear, quadrático e na interação com R, os limites inferiores e

superiores, para cada dose, apresentam valores diferentes. Também os erros na taxa de aplicação nas inclinações de -11° e 11° apresentam valores diferentes.

Tabela 46 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-1,6576	1,3445	-18,27	131,52
300	-2,2103	1,7373	-29,41	142,65
400	-2,6309	2,0431	-40,54	153,79
500	-2,9541	2,2900	-51,68	164,92

Quanto as inclinações transversais, apenas para a dose de 200kg ha^{-1} foi observada magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em valores superiores ao limite. Como IT apresentou efeito linear apenas, para todas doses bem como para as inclinações de -11° e 11° , o erro é mesmo $\pm 13,38\text{kg ha}^{-1}$.

Tabela 47 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-8,2244	8,2244	-13,38	13,38
300	NA	NA	-13,38	13,38
400	NA	NA	-13,38	13,38
500	NA	NA	-13,38	13,38

Contudo, para melhor análise do desempenho do dosador D3 e fertilizante mistura farelada, é necessário conhecer o efeito combinado de IL e IT sobre a taxa de aplicação, mostrado na Figura 25.

Analisando a Figura 25 é possível observar que o intervalo de IL diminui para inclinações transversais negativas. Na dose de 300kg ha⁻¹, por exemplo, se comparados os intervalos de IL, quando IT é igual a 11° e -11°, ocorre uma redução de 40,16% no intervalo de IL. Além da redução da magnitude do intervalo, para inclinações transversais a aplicação se torna menos precisa. Na dose de 400kg ha⁻¹, quando IT é igual a 11°, é necessário que a inclinação longitudinal seja alterada em 0,9708° para alterar a taxa de aplicação em 5kg ha⁻¹. Já quando IT é igual a -11° é necessário alterar 0,5594° de IL. Outro efeito que pode ser observado é que o aumento da dose, aumenta o intervalo de inclinações, como pode ser visualizado também na Tabela 51, a área correspondente ao intervalo de inclinações recomendados à operação para a dose de 500kg ha⁻¹ é cerca de 1,7 vezes maior que a área para a dose de 200kg ha⁻¹.

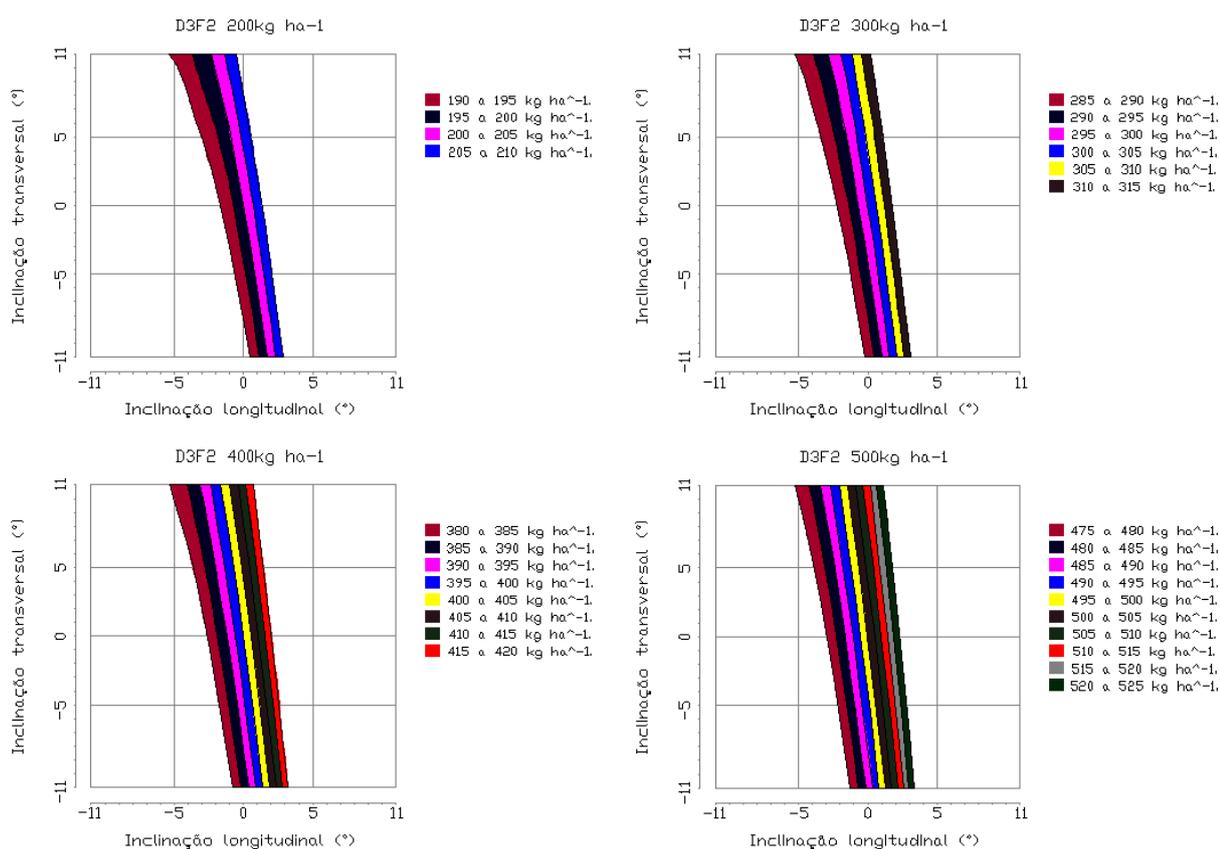


Figura 25 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

A Equação 17 define a taxa de aplicação do fertilizante mistura de grânulos para o dosador D3, com unidade de saída em kg ha^{-1} . Na Tabela 48, são apresentados os valores das velocidades de acionamento que correspondem as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , considerando IL e IT iguais a zero.

$$Y = (51,7446 + 13,7787IL - 6,6973IT^2 + 38,9494R + 0,2937ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (17)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação de fertilizantes, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Rotação de acionamento, min^{-1} ;

V = Velocidade de deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Tabela 48 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.

Taxas de aplicação (kg ha^{-1})	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	39,7505
300	0	0	60,2899
400	0	0	80,8294
500	0	0	101,3689

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

A partir da Equação 17, e das velocidades de acionamento da Tabela 48, foram então determinados, considerando os efeitos isolados de IL e IT, os intervalos de inclinações longitudinais, Tabela 49, e transversais, Tabela 50, recomendados à operação.

Na Tabela 49 é possível constatar que o aumento da dose propiciou aumentos no intervalo de inclinações. Como o efeito de IL foi significativo de forma linear e na interação com R, para cada dose os limites inferior e superior são iguais com sinais opostos. O mesmo efeito é observado para os erros nas inclinações extremas de -11 e 11° , sendo estes porem, diferentes entre as doses devido ao efeito da interação com R.

Tabela 49 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-3,1432	3,1432	-35,00	35,00
300	-3,8113	3,8113	-43,29	43,29
400	-4,2647	4,2647	-51,59	51,59
500	-4,5923	4,5923	-59,88	59,88

Já para IT, é possível observar na Tabela 50, que esta não apresenta magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em valores superiores ao limite estabelecido, sendo assim, o seu intervalo recomendado à operação de -11 a 11° . Como IT não apresentou efeito na interação com R, para todas doses os erros nos extremos são iguais, porem com sinais opostos para as inclinações negativas e positivas.

Apesar das inclinações transversais, de forma isolada, não possuem magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação acima do limite estabelecido, estas poderão alterar o intervalo de inclinações longitudinais. Os possíveis efeitos são a alteração da magnitude ou, deslocamento do intervalo de inclinações longitudinais, como mostra a Figura 26.

Tabela 50 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D3, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^{\circ}$)	Limite Superior ($^{\circ}$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	NA	NA	9,21	-9,21
300	NA	NA	9,21	-9,21
400	NA	NA	9,21	-9,21
500	NA	NA	9,21	-9,21

Como esperado, na Figura 26 pode ser observado que o intervalo de IL apenas se desloca em função de IT não tendo sua magnitude alterada. O aumento das inclinações transversais ocasiona o aumento da taxa de aplicação, deslocando o intervalo de IL para a direita. O aumento da dose ocasiona o aumento dos intervalos tanto de IL quanto de IT.

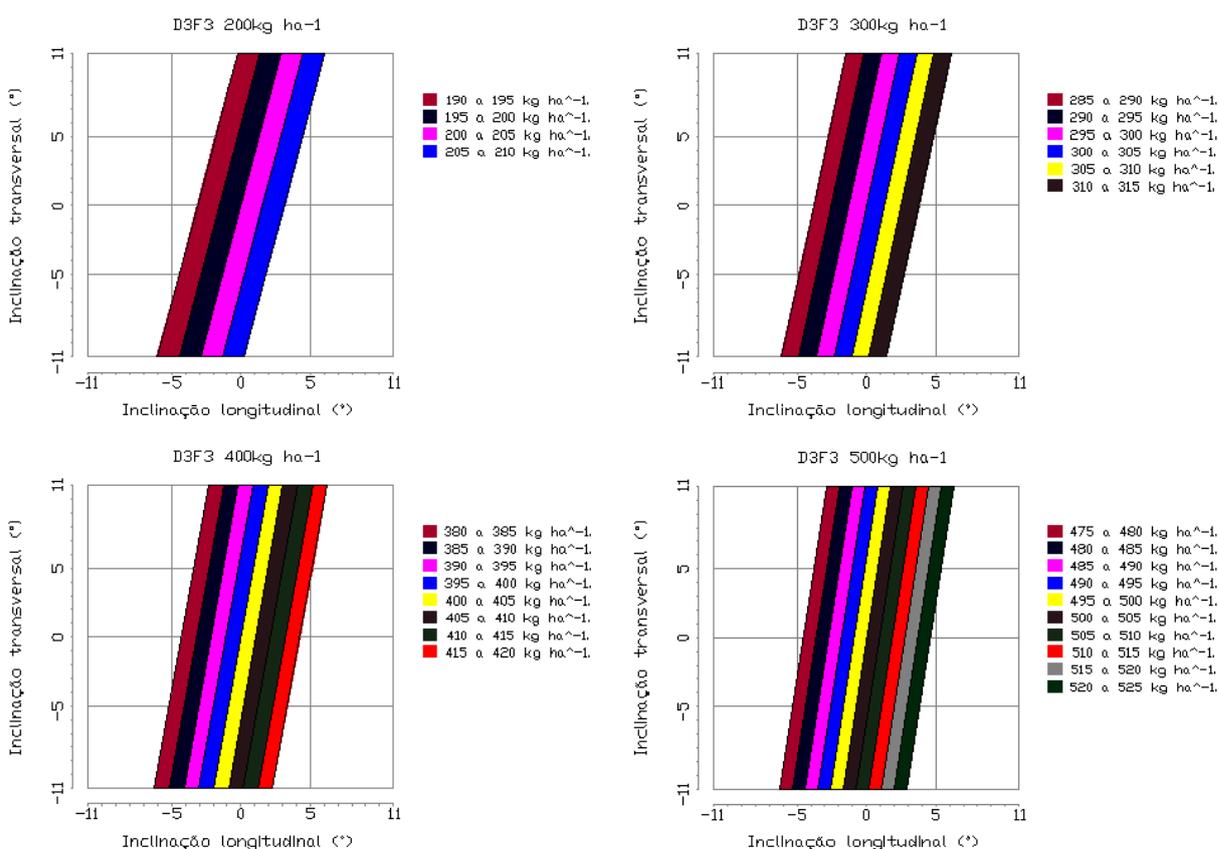


Figura 26 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h^{-1} e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Analisando a Tabela 51 constata-se que a área do intervalo para a dose de 500kg ha⁻¹ é aproximadamente 1,5 vezes maior que a da dose de 200kg ha⁻¹. Porém, como para os demais dosadores, devido ao efeito da interação de IL e R, doses menores apresentam maior precisão. Para que sejam alterados 5kg ha⁻¹, na dose de 200kg ha⁻¹, com um valor fixo de IT, é necessário alterar 1,5714°. Para a mesma alteração na dose de 500kg ha⁻¹, é necessário alterar 0,9182° de IL.

Para determinar com que fertilizante o dosador helicoidal com descarga por gravidade obtém melhor desempenho, foram comparadas as áreas formadas pelos limites de inclinações longitudinais e transversais, Tabela 51. O melhor desempenho do dosador foi dependente da dose aplicada, sendo mais eficiente na aplicação do fertilizante em mistura de grânulos na dose de 500kg ha⁻¹.

Tabela 51 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D3 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média (kg ha ⁻¹)
	200	300	400	500	
Mistura granulada	137,90	158,79	170,32	177,96	161,24
Mistura farelada	69,97	89,77	104,97	116,89	95,40
Mistura de Grânulos	138,29	167,69	187,64	202,06	173,92
Média (kg ha ⁻¹)	115,39	138,75	154,31	165,64	143,52

As propriedades físicas do fertilizante alteram a qualidade da sua distribuição e, para o dosador D3, em média, quanto ao tipo de fertilizante, o melhor desempenho foi obtido para o fertilizante mistura de grânulos. Em relação a dose, o melhor desempenho foi obtido para a dose de 500kg ha⁻¹. Na média geral dos tipos de fertilizante e doses, o dosador D3 apresenta um intervalo de inclinações recomendadas à operação correspondente a 29,65% do intervalo total possível.

d) Dosador 4

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16

Inicialmente é necessário adaptar o modelo matemático para que sua unidade saída seja em kg ha^{-1} , como mostra a Equação 18. Em sequência, foram definidas as velocidades de acionamento correspondentes as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , quando IL e IT são iguais a zero, como mostra a Tabela 52.

Fazendo uso da Equação 18, com valores de R apresentados na Tabela 52, foram variados os valores de IL, e mantido o valor de IT em zero para isolar o efeito das inclinações longitudinais. Com isso, foram definidos os limites de inclinações longitudinais recomendados à operação, como mostra a Tabela 53.

$$Y = (-399,1217 + 46,9823IL + 3,6424IL^2 - 3,6716IT^2 + 44,2261R - 0,1225R^2) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (18)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Velocidade de acionamento, min^{-1} ;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Tabela 52 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	32,2566
300	0	0	45,2113
400	0	0	59,5455
500	0	0	75,8244

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Na Tabela 53 é possível observar que o aumento das doses propiciou o aumento dos intervalos de inclinações longitudinais, passando de -1,0420 a 0,8956°, na dose de 200kg ha⁻¹, para -3,1772 a 2,0642° para a dose de 500kg ha⁻¹, correspondendo a um aumento de 270,50%. Quanto a variação da dose nas inclinações extremas, de -11 e 11°, é possível observar que para todas as doses, para cada inclinação, os desvios foram os mesmos, isso porque IL não apresentou interação com a velocidade de acionamento, logo, para qualquer dose o efeito das inclinações longitudinais terá a mesma magnitude.

Tabela 53 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-1,0420	0,8956	-16,91	212,79
300	-1,6470	1,3048	-16,91	212,79
400	-2,3402	1,6933	-16,91	212,79
500	-3,1772	2,0642	-16,91	212,79

Porém, é possível observar que os erros da taxa de aplicação nas inclinações extremas mostraram-se bastante elevados para a inclinação de 11°, chegando a alterar em mais de 100% a taxa de aplicação, no caso da dose de 200kg ha⁻¹, por exemplo. Esse fato demonstra extrema fragilidade do dosador nesses pontos, pois tais desvios da taxa de aplicação podem ser

extremamente prejudiciais ao andamento dos cultivos. Alterações nas taxas de aplicação merecem atenção. Nava et al. (2011) afirma que a alteração da dose de 300 para 600 kg ha⁻¹, por exemplo, para a cultura da soja, resultou em um aumento de produtividade de 29,08%. Gonçalves Jr. et al. (2008) e Gonçalves Jr. et al. (2007) ao dobrar a dosagem recomendada pela análise de solo, para a cultura do milho, obtiveram aumentos de produtividade de 17,87 e 7,69%, respectivamente. Apesar de aumentos da dosagem proporcionarem aumentos da produtividade, estes podem não ser economicamente viáveis resultando em desperdícios.

Tabela 54 - Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	3,5008	NA	-98,73	-98,73
	-3,5008			
300	4,2877	NA	-98,73	-98,73
	-4,2877			
400	4,9510	NA	-98,73	-98,73
	-4,9510			
500	5,5353	NA	-98,73	-98,73
	-5,5353			

Quanto aos limites de inclinações transversais, apresentados na Tabela 54, é possível observar que foram determinados apenas limites inferiores. Como IT apresentou apenas efeito quadrático, e acompanhado de coeficiente de regressão com sinal negativo, para todos valores de IT serão observadas reduções na taxa de aplicação. Também devido ao efeito quadrático, para cada dose foram definidos dois limites inferiores, com o mesmo valor e sinais opostos.

De forma semelhante ao que ocorreu para IL, os desvios da taxa de aplicação nas inclinações de -11 e 11°, observa-se que para todas doses o valor é o mesmo, inclusive para o sinal. Ou seja, as inclinações transversais sempre irão ocasionar reduções da taxa de aplicação e, como não possui interação com a velocidade de acionamento, para qualquer dose, a magnitude das alterações ocasionadas será a mesma.

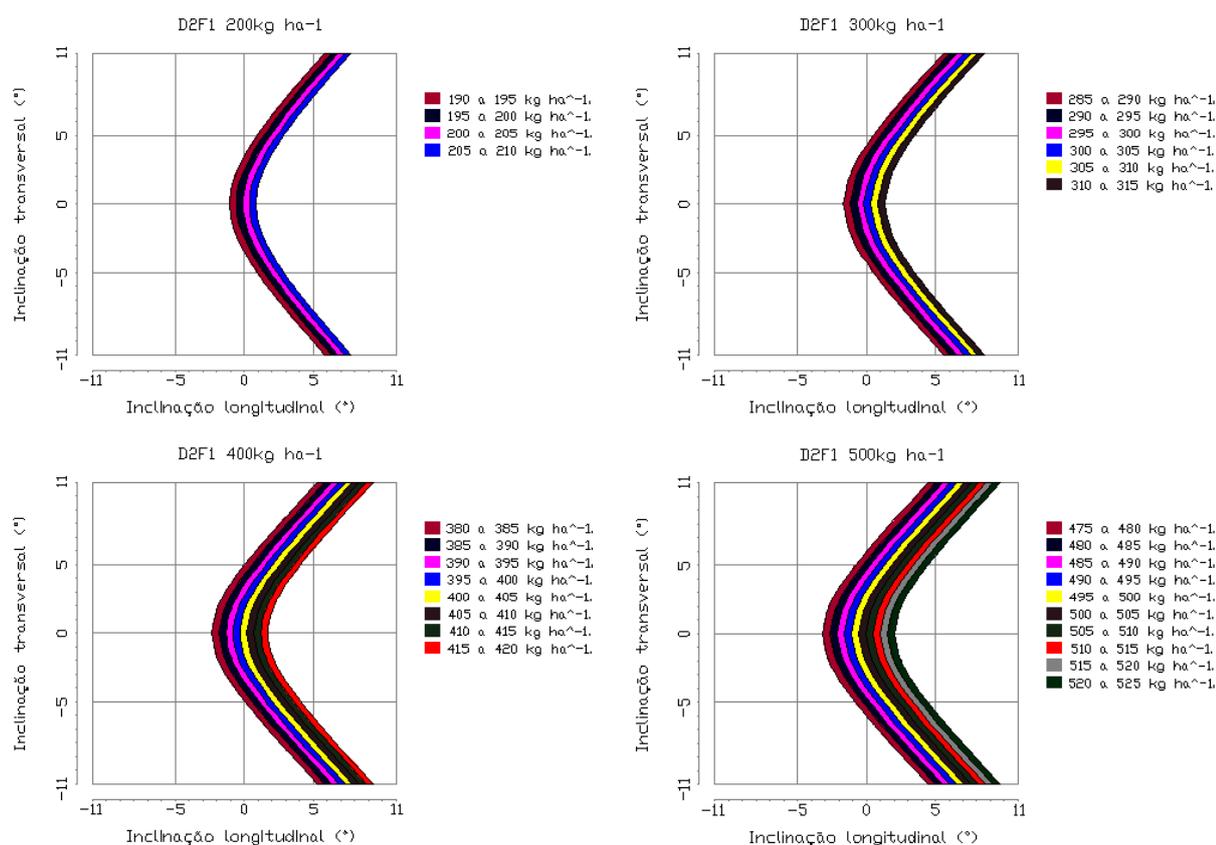


Figura 27 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Além de conhecer os intervalos quando se considera o efeito isolado de IL e IT, é importante conhecer o efeito combinado dessas variáveis sobre a taxa de aplicação, como mostra a Figura 27.

Na Figura 27 é possível observar que para todas as doses, o efeito das inclinações longitudinais e transversais foi semelhante, sendo apenas o intervalo de inclinações ampliado com o aumento da dose. Para todos valores de IT, de -11 a 11°, o intervalo recomendado a operação de IL não é alterado, este apenas desloca-se. Este deslocamento ocasionado por IT, faz que as curvas que representam a taxa de aplicação formem curvas com formato da letra “C”, efeito este ocasionado pois, IT apresentou apenas efeito quadrático. Como nenhuma das variáveis apresentou interação com a velocidade de acionamento, independente da dose, o efeito de IL e IT sobre a taxa de aplicação é o mesmo, sendo os intervalos de inclinação ampliados devido ao efeito da proporcionalidade dos limites.

ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30

A Equação 19 apresenta o modelo matemático do dosador D4 e fertilizante mistura farelada, adequado para que a unidade de saída seja em kg ha^{-1} . Em seguida, considerando valor zero para IL e IT, foram definidas as velocidades de acionamento correspondentes as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , como mostra a Tabela 55.

$$Y = (-196,4753 + 46,229IL + 6,3196IL^2 + 65,773R + 0,9491ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (19)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

R = Velocidade de acionamento, revoluções min^{-1} ;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Analisando a Equação 19, é possível observar que IT não apresentou efeito significativo. Devido a isso, todo o intervalo de IT, -11 a 11° , é recomendado à operação. Então, fazendo uso da Equação 19 e dos valores de R apresentados na Tabela 55, foram determinados os intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação, como mostra a Tabela 56.

Tabela 55 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} para o dosador D4, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento de 0,80m.

Taxas de aplicação (kg ha^{-1})	IL ($^\circ$)	IT ($^\circ$)	R (rpm)
200	0	0	27,3133
300	0	0	39,4763
400	0	0	51,6394
500	0	0	63,8024

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Analisando a Tabela 56 é possível observar que o aumento das doses propiciou o aumento dos intervalos de inclinações. Para a dose de 200kg ha⁻¹, o intervalo vai de -1,2444° a 1,0180° e para a dose de 300kg ha⁻¹ de -1,6359° a 1,3051°, correspondendo a um aumento de aproximadamente 130%. Devido ao efeito quadrático de IL bem como a interação com R, observa-se que os desvios da taxa de aplicação nas inclinações extremas apresenta valores diferentes tanto para as doses quanto para as inclinação longitudinais de -11 e 11°. Ou seja, a velocidade de acionamento altera o efeito das inclinações longitudinais e, quanto maior a dose, conseqüentemente maior será a velocidade de acionamento e maior será o efeito de IL sobre a taxa de aplicação.

Tabela 56 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 080m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	-1,2444	1,0180	-3,63	194,79
300	-1,6359	1,3051	-19,50	210,67
400	-1,9262	1,5255	-35,37	226,54
500	-2,1454	1,7016	-51,24	242,41

A Figura 28 mostra os intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação. Como o efeito das inclinações transversais não foi significativo, todos seus valores são recomendados à operação e, é possível observar que esta não altera o intervalo de IL, tanto em magnitude quanto em posição.

Ainda na Figura 28 é possível observar que o intervalo de inclinações longitudinais é ampliado com o aumento das doses. Porém, como IL apresentou efeito na interação com R, nas maiores doses o efeito das inclinações longitudinais é mais representativo sendo que as faixas que representam alterações da taxa de aplicação de 5kg ha⁻¹, são mais estreitas nas doses de 400 e 500kg ha⁻¹ do que na dose de 200kg ha⁻¹.

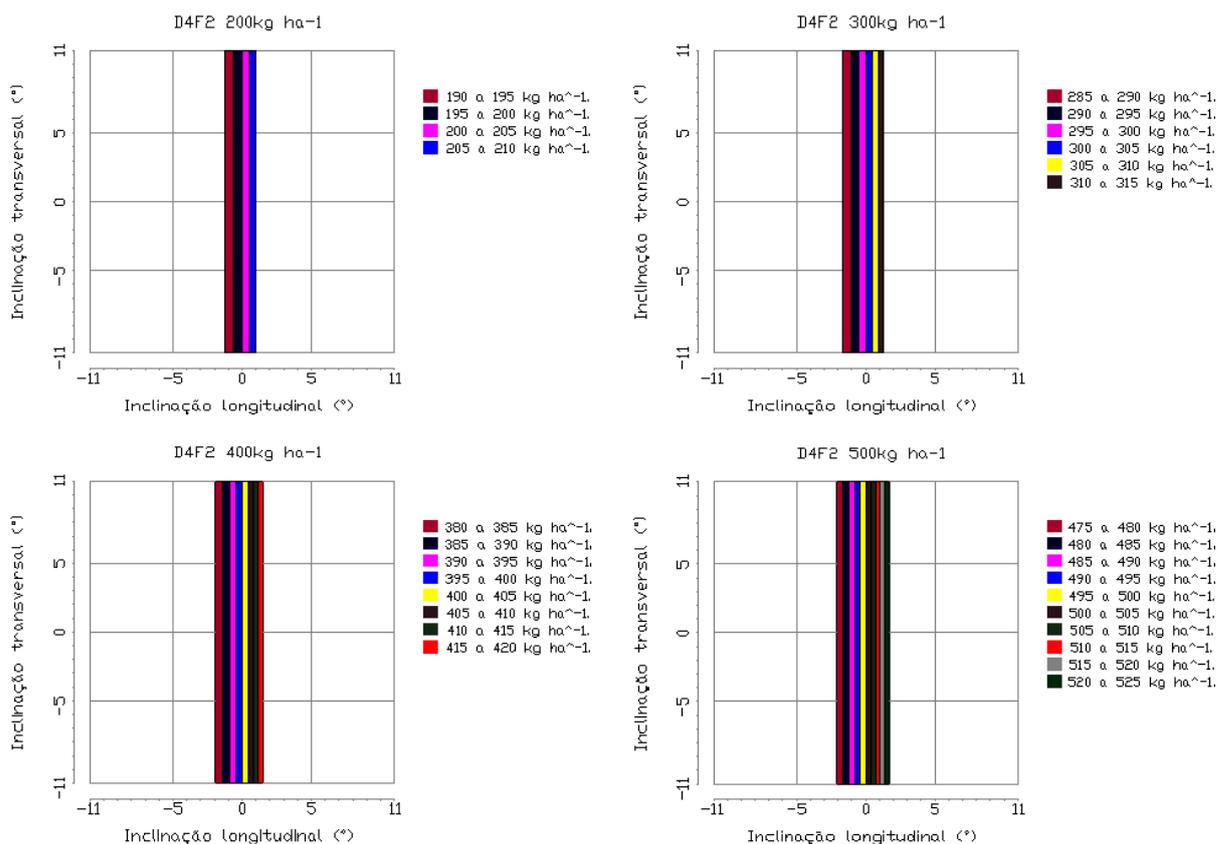


Figura 28 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

Na Equação 20, é apresentado o modelo matemático da taxa de aplicação do fertilizante mistura de grânulos para o dosador D4, adaptado para que a unidade de saída seja em kg ha⁻¹. A partir da Equação 20, considerando IL e IT iguais a zero, foram determinadas as velocidades de acionamento que correspondem as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, como mostra a Tabela 57.

$$Y = (294,2496 + 61,6166IL + 1,3605IL^2 + 55,135R - 0,5143ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (20)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

R = Velocidade de acionamento, revoluções min⁻¹;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Da mesma forma que ocorreu para o fertilizante mistura farelada, as inclinações transversais não foram significativas. Com isso, todos os seus valores estudados, -11 a 11°, são recomendados à operação. Fazendo uso da Equação 20, e dos valores de R mostrados na Tabela 57, foram determinados os intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação, como mostra a Tabela 58.

Tabela 57 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D4, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6,5km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	26,1011
300	0	0	41,8201
400	0	0	57,5391
500	0	0	73,2581

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Analisando a Tabela 58 é possível observar que o aumento das doses aumenta o intervalo de inclinações, tanto que, para a dose que 500kg ha⁻¹, não foi encontrado um limite inferior, sendo então a operação, para esta dose, recomendada para o intervalo de -11 a 6,5857°, cerca de 265% maior que o intervalo da dose de 300kg ha⁻¹, por exemplo. Quanto aos desvios nas inclinações extremas, observa-se que, devido ao efeito da interação com a velocidade de acionamento, para diferentes doses, os erros são diferentes porém, o aumento

da dose faz com que esses erros sejam reduzidos. Para a mesma dose, os erros são diferentes entre as inclinações de -11 e 11° devido ao efeito quadrático de IL.

A Figura 29 mostra os intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação. De forma semelhante ao fertilizante mistura farelada, as inclinações transversais também não foram significativas sendo então, todos os seus valores estudados, -11 a 11° , recomendados à operação.

Tabela 58 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D4, fertilizante mistura de grânulos, velocidade de $6,5\text{km h}^{-1}$ e espaçamento de $0,80\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	-1,9003	1,7153	-42,17	80,16
300	-3,7076	2,9466	-31,91	69,9
400	-8,4360	4,5377	-21,65	59,64
500	NA*	6,5857	-11,39	49,38

* - Não Apresenta.

Diferente do que ocorre para os demais dosadores e fertilizantes, na Figura 29 é possível observar que, além do aumento dos intervalos de inclinações recomendados à operação aumentarem com o aumento da dose, este aumento se dá também com aumento da precisão, ocasionado pelo efeito da interação entre as inclinações longitudinais e as velocidades de acionamento. Comparando as doses de 200 e 500kg ha^{-1} , observa-se que a área correspondente ao intervalo recomendado à operação, Tabela 59, é $486,41\%$ maior para a dose de 500kg ha^{-1} .

Analisando a Tabela 59 é possível constatar que para o dosador D4, o seu melhor desempenho foi para o fertilizante mistura de grânulos na dose de 500kg ha^{-1} . Analisando as médias, quanto ao tipo de fertilizante, o melhor desempenho do dosador foi obtido com o fertilizante mistura de grânulos e, quanto a dose, o melhor desempenho foi obtido para a dose de 500kg ha^{-1} . Na média geral dos tipos de fertilizante e doses, o dosador D4 apresenta um intervalo de inclinações recomendadas à operação correspondente a $25,56\%$ do intervalo total possível.

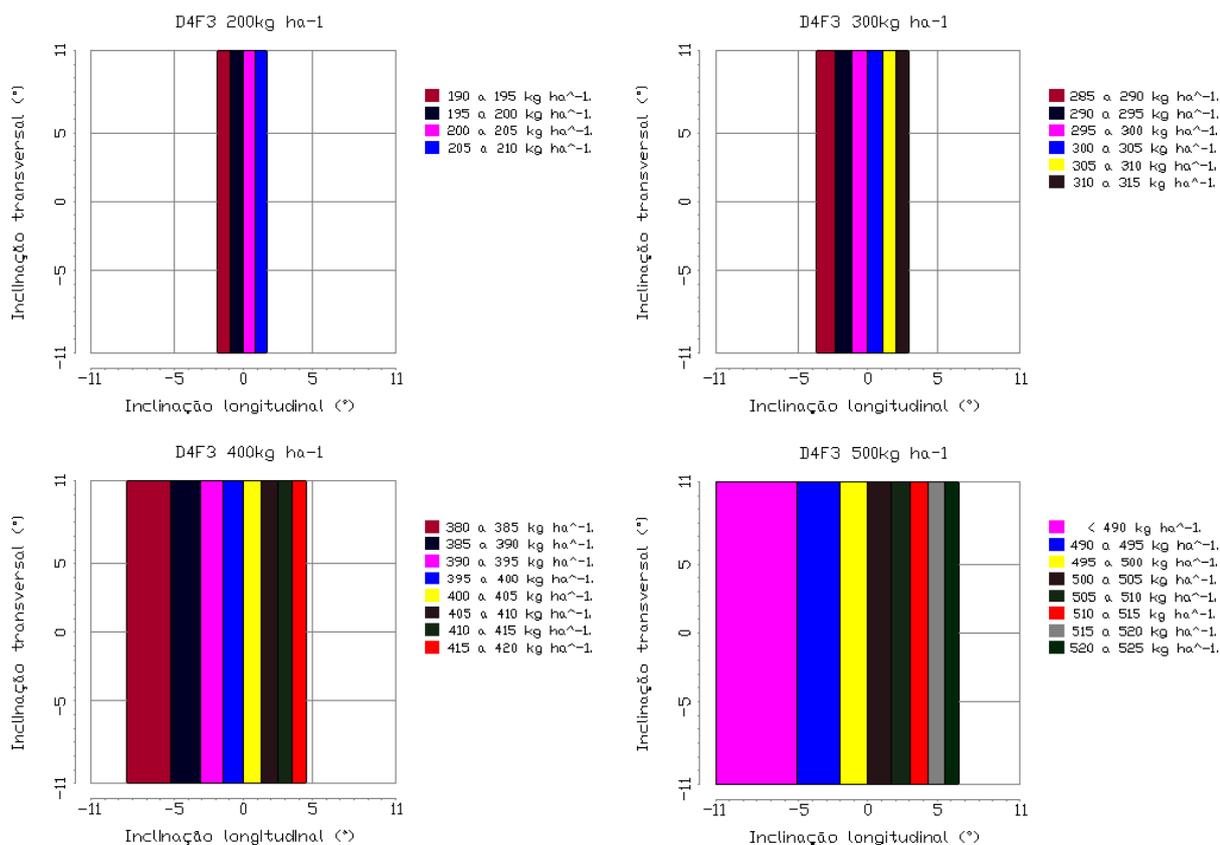


Figura 29 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6,5km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Tabela 59 – Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D4 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média
	200	300	400	500	
Mistura granulada	41,95	65,60	88,74	115,31	77,90
Mistura farelada	49,78	64,70	75,94	84,63	68,76
Mistura de Grânulos	79,54	146,39	285,33	386,89	224,54
Média	57,09	92,23	150,00	195,61	123,73

e) Dosador 5

i) Fertilizante mistura granulada 16-16-16

Na Equação 21 é apresentado o modelo matemático, adequado para unidade de saída em kg ha^{-1} , do dosador D5 e fertilizante mistura granulada. Fazendo uso da Equação 21, e atribuindo para IL e IT valor zero, foram definidos as velocidades de acionamento correspondentes as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , como mostra a Tabela 60.

$$Y = (33,192 - 5,3599IL + 0,6008IL^2 + 6,8621IT + 174,5682R - 2,2919ILR - 1,21ITR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (21)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Velocidade de acionamento, $\text{revoluções min}^{-1}$;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Para o dosador D5 e fertilizante mistura granulada, tanto IL quanto IT apresentaram efeito significativo sendo então determinados os intervalos de inclinações longitudinais, Tabela 61, e de inclinações transversais, Tabela 62, recomendados à operação. Tais intervalos foram definidos para o efeito isolado de cada uma das variáveis, ou seja, para os intervalos de IL, IT foi considerada zero, e para os intervalos de IT, IL foi considerada zero.

Para os intervalos de IL, mostrados na Tabela 61, é possível observar que o aumento da dose propiciou o aumento do intervalo de inclinações, passando de $3,0140$ a $-2,4696^\circ$ na dose de 200kg ha^{-1} , para $3,3941$ a $-2,9665^\circ$ na dose de 400kg ha^{-1} , representando um aumento de aproximadamente 116%.

Tabela 60 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	4,9654
300	0	0	7,5432
400	0	0	10,1210
500	0	0	12,6988

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Para os erros nas inclinações extremas, tanto para as doses quanto para as inclinações de -11 e 11°, foram observados valores diferentes. Esse efeito observado devido ao efeito de IL², para as inclinações de -11 e 11°, e devido ao efeito da interação entre IL e R. Logo, para maiores doses, com maiores velocidades de acionamento, os erros ocasionados por IL serão maiores.

Tabela 61 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	3,0140	-2,4696	57,07	-24,77
300	3,2628	-2,7759	71,52	-39,21
400	3,3941	-2,9665	85,96	-53,65
500	3,4747	-3,0970	100,40	-68,09

Para as inclinações transversais, Tabela 62, observa-se que estas não apresentaram magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em valores acima do limite estabelecido. Sendo então, todos os seus valores estudados, -11 a 11°, recomendados à operação. Como IT apresentou efeito linear e na interação com a velocidade de acionamento, é possível observar

que para as inclinações de -11° e 11° o erro na taxa de aplicação possui mesmo valor, com sinais opostos. Para as doses, os erros foram diferentes devido à interação com R.

Tabela 62 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura granulada 16-16-16, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$.

Dose desejada (kg ha^{-1})	Limite Inferior ($^\circ$)	Limite Superior ($^\circ$)	Variação da dose (kg ha^{-1})	
			-11°	11°
200	NA	NA	-2,06	2,06
300	NA	NA	5,58	-5,58
400	NA	NA	13,22	-13,22
500	NA	NA	20,86	-20,86

* - Não apresenta.

A Figura 30 mostra os intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação. É possível observar que o aumento das doses propiciou o aumento do intervalo de inclinações.

O efeito de IT, combinado com o efeito de IL e da interação entre IL e R, propiciou um efeito diferenciado em relação aos demais fertilizantes e dosadores. Para a dose de 200kg ha^{-1} , observa-se que o efeito de IT desloca o intervalo de IL, a partir da inclinação transversal de -11° para 11° , para a direita. Para as demais doses, o intervalo de IL é deslocado para a esquerda.

Apesar de o aumento das doses propiciarem o aumento dos intervalos de inclinações recomendados à operação, para as maiores doses a precisão é menor. Com o aumento das doses também é possível observar que a inclinação das retas que representam as variações da taxa de aplicação aumenta, ou seja, para menores inclinações transversais, a variação da taxa de aplicação é maior que para as menores doses.

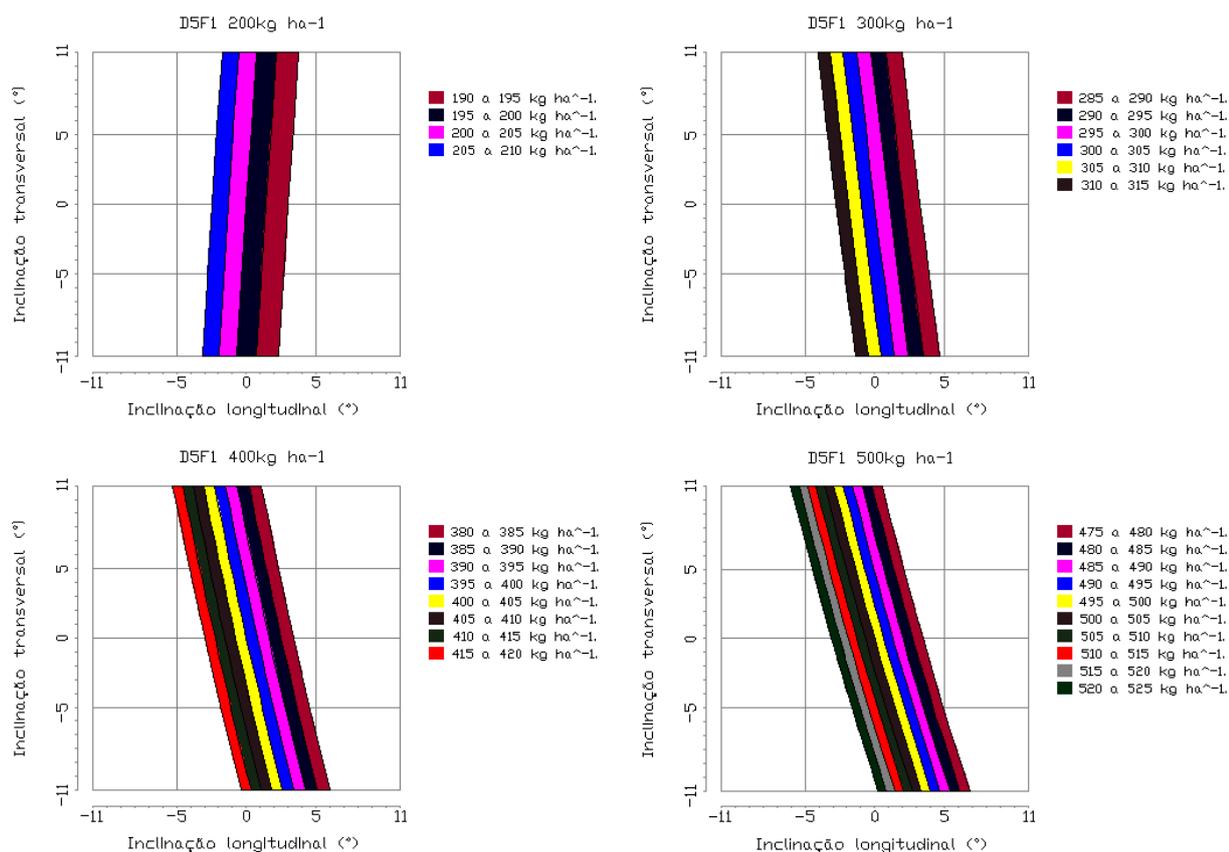


Figura 30 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura granulada 16-16-16, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

ii) Fertilizante mistura farelada 00-15-30

Na Equação 22 é apresentado o modelo matemático, adequado para unidade de saída em kg ha⁻¹, do dosador D5 e fertilizante mistura farelada. Fazendo uso da Equação 22, e atribuindo para IL e IT valor zero, foram definidos as velocidades de acionamento correspondentes as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹, como mostra a Tabela 63.

$$Y = (602,848 - 134,2122IL + 6,1158IL^2 + 298,1259R - 1,8472ILIT) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (22)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha⁻¹;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Velocidade de acionamento, revoluções min⁻¹;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h⁻¹;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Para o dosador D5 e fertilizante mistura farelada, tanto IL quanto IT apresentaram efeito significativo. Porém, para as inclinações transversais o efeito foi na interação com IL, de forma que não é possível determinar seu efeito isolado, pois se for atribuído o valor zero para IL o efeito de IT também será zero. Na Tabela 64 são apresentados os intervalos de inclinações longitudinais os quais, foram determinados considerando IT igual a zero.

Analisando a Tabela 64 é possível observar que com o aumento das doses ocorreu o aumento do intervalo de inclinações longitudinais recomendados à operação. A dose de 500 kg ha⁻¹, é aproximadamente 170% maior que o intervalo para a dose de 300kg ha⁻¹, por exemplo.

Tabela 63 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de deslocamento de 6,5km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	3,7920
300	0	0	6,6990
400	0	0	9,6061
500	0	0	12,5131

IL – Inclinação longitudinal.

IT – Inclinação transversal.

R – Velocidade de acionamento.

Quando ao erro da taxa de aplicação nas inclinações extremas, devido ao efeito de IL², os valores foram diferentes apenas entre os valores de -11 e 11° e, como não foi observado efeito da interação entre IL e R, para qualquer dose, a magnitude da alteração da taxa de aplicação, ocasionada por IL será a mesma.

Tabela 64 - Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura farelada 00-15-30, velocidade de 6,5km h⁻¹ e espaçamento de 0,80m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	0,6659	-0,6278	255,73	-84,96
300	1,0156	-0,9293	255,73	-84,96
400	1,3780	-1,2233	255,73	-84,96
500	1,7547	-1,5104	255,73	-84,96

Para determinar os limites de inclinações transversais, é necessário analisar o efeito combinado entre IL e IT, como mostra a Figura 31. É possível observar que o efeito ocasionado por IT é praticamente insignificante, pois as retas que representam as alterações da taxa de aplicação são praticamente constantes em todo o intervalo de IT. Além disso, o efeito de IT não possui magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação em mais de 5%, sendo desta forma todos seus valores estudados, -11 a 11°, recomendados à operação.

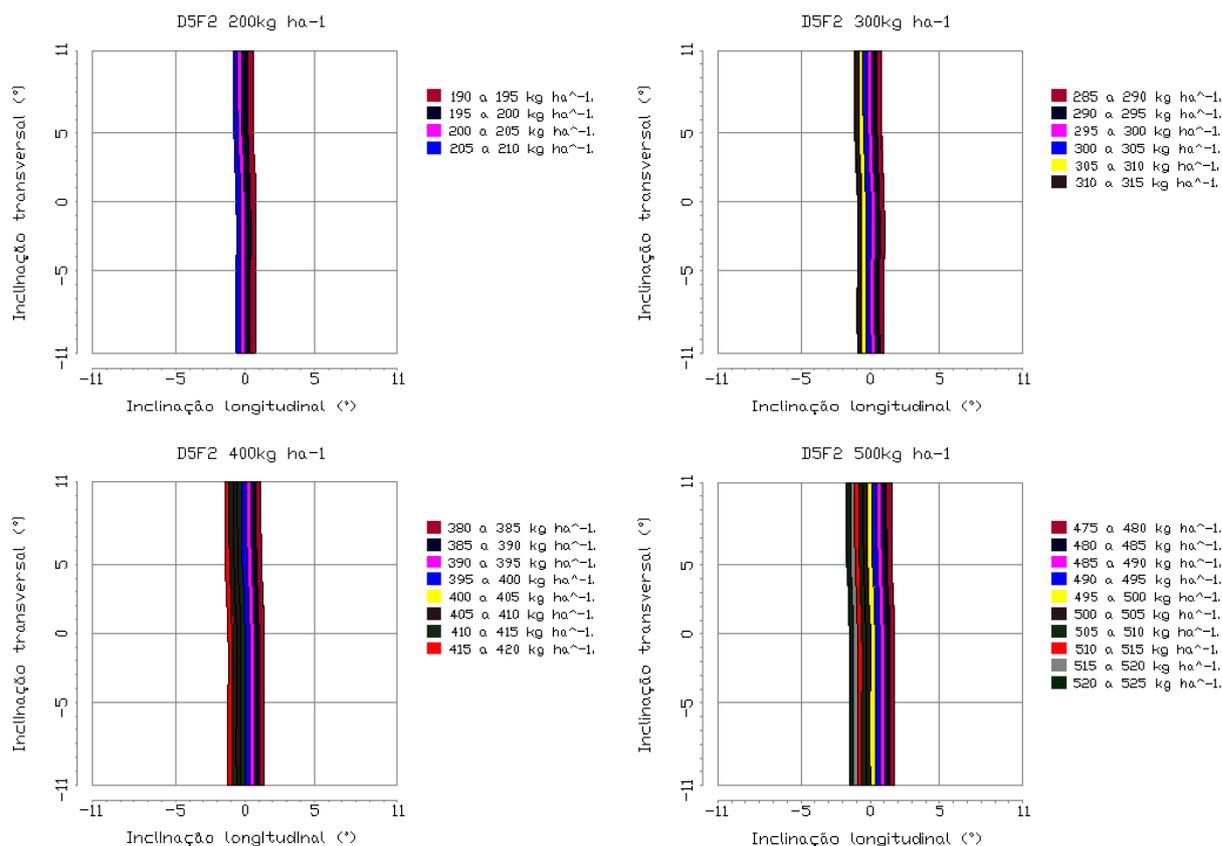


Figura 31 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura farelada 00-15-30, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,45m.

Analisando a Tabela 68 é possível observar que o dosador D5, para a média das 4 doses, apresentou intervalo de inclinações recomendado a operação muito baixo, pois a área correspondente é de apenas 10% do intervalo total possível. Esse fato ocorre devido as disposições construtivas do dosador e das propriedades físicas do fertilizante. Associando a sua densidade, granulometria, ângulo de repouso e disposições construtivas do dosador constata-se que este é bastante sensível aos efeitos de inclinações, principalmente longitudinais, sendo então seu intervalo de inclinações recomendado à operação o menor dos entre os fertilizantes e dosadores estudados.

Bonotto (2012), com o mesmo mecanismo dosador e tipo de fertilizante encontrou resultados semelhantes, pois o dosador apresentou os segundos maiores coeficientes de variação da taxa de aplicação em função de inclinações longitudinais, e este foi maior para as menores doses.

iii) Fertilizante mistura de grânulos 05-20-20

Na Equação 23 é apresentado o modelo matemático, adequado para unidade de saída em kg ha^{-1} , do dosador D5 e fertilizante mistura farelada. Fazendo uso da Equação 23, e atribuindo para IL e IT valor zero, foram definidas as velocidades de acionamento correspondentes as doses de 200, 300, 400 e 500kg ha^{-1} , como mostra a Tabela 65.

$$Y = (160,0277 - 17,9834IL + 0,7444IL^2 - 3,5973IT + 223,5323R - 2,6707ILR) * \left(\frac{6}{10VE}\right) \quad (23)$$

em que,

Y = Taxa de aplicação, kg ha^{-1} ;

IL = Inclinação longitudinal, graus;

IT = Inclinação transversal, graus;

R = Velocidade de acionamento, revoluções min^{-1} ;

V = Velocidade deslocamento trator-semeadora, km h^{-1} ;

E = Espaçamento entre linhas, m.

Para o dosador D5 e fertilizante mistura de grânulos, tanto IL quanto IT apresentaram efeito significativo sendo então determinados os intervalos de inclinações longitudinais, Tabela 66, e de inclinações transversais, Tabela 67, recomendados à operação. Tais intervalos foram definidos para o efeito isolado de cada uma das variáveis, ou seja, para os intervalos de IL, IT foi considerada zero, e para os intervalos de IT, IL foi considerada zero.

Quanto ao intervalo de inclinações longitudinais, Tabela 66, é possível observar que com o aumento das doses ocorreu o aumento do intervalo de inclinações longitudinais, o intervalo para a dose de 300kg ha^{-1} , por exemplo é aproximadamente 124% maior que o da dose de 200kg ha^{-1} .

Tabela 65 – Velocidades de acionamento correspondentes as taxas de aplicação de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹ para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de deslocamento de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,50m.

Taxas de aplicação (kg ha ⁻¹)	IL (°)	IT (°)	R (rpm)
200	0	0	3,7577
300	0	0	5,9945
400	0	0	8,2313
500	0	0	10,4682

IL – Inclinação longitudinal.
IT – Inclinação transversal.
R – Velocidade de acionamento.

Os erros na taxa de aplicação para as inclinações extremas também aumentaram com o aumento das doses, fato este devido a interação de IL com R. Para a mesma dose observa-se que os erros foram diferentes para as inclinações de -11 e 11°.

Tabela 66 – Intervalos de inclinações longitudinais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,50m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	1,8781	-1,7072	79,66	-43,63
300	2,3247	-2,1090	92,80	-56,77
400	2,6310	-2,3952	105,94	-69,91
500	2,8528	-2,6104	119,08	-83,05

Para as inclinações transversais, Tabela 67, observa-se que esta não possui magnitude capaz de alterar a taxa de aplicação acima do limite estabelecido, sendo então, todos seus valores estudados, -11 a 11°, recomendados à operação. Como para IT o único efeito observado foi linear, para todas doses e inclinações o erro possui a mesma magnitude, porém com sinais opostos para as inclinações de -11 e 11°.

Tabela 67 – Intervalos de inclinações transversais recomendados à operação e erros de aplicação nos extremos para o dosador D5, fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, velocidade de 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,50m.

Dose desejada (kg ha ⁻¹)	Limite Inferior (°)	Limite Superior (°)	Variação da dose (kg ha ⁻¹)	
			-11°	11°
200	NA	NA	7,91	-7,91
300	NA	NA	7,91	-7,91
400	NA	NA	7,91	-7,91
500	NA	NA	7,91	-7,91

A Figura 32 apresenta os intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação. Da mesma forma que para os demais dosadores, o aumento das doses propiciou o aumento dos intervalos de inclinação recomendados à operação.

Para todas as doses, é possível observar que as inclinações transversais deslocaram o intervalo de IL da direita para esquerda, porém mantendo a sua magnitude. Apesar de que para as maiores doses o intervalo é maior, nas menores doses a precisão é maior, pois as faixas correspondentes à alteração de 5kg ha⁻¹, na dose de 200kg ha⁻¹ possuem maior área que na dose de 500kg ha⁻¹.

Analisando a Tabela 68 é possível constatar que o melhor desempenho do dosador D5 foi obtido para o fertilizante mistura granulada, na dose de 500kg ha⁻¹. Analisando as médias, quanto a tipo de fertilizante, o melhor desempenho foi com o fertilizante mistura granulada e, quanto a dose, o melhor desempenho foi observado para a dose de 500kg ha⁻¹. Na média geral dos tipos de fertilizante e doses, o dosador D5 apresenta um intervalo de inclinações recomendadas à operação correspondente a 19,74% do intervalo total possível.

Na Tabela 69 são apresentadas as áreas correspondentes aos intervalos de inclinação recomendados à operação para todos dosadores e fertilizantes estudados. É possível observar que o melhor desempenho foi obtido pelo dosador D1 com o fertilizante mistura farelada. Nesta situação, não foram determinados limites de inclinações recomendados á operação sendo todos os valores de IL e de IT recomendados à operação para todas doses estudadas, ou seja, o dosador D1 e fertilizante mistura farelada obteve área correspondente ao intervalo de inclinações equivalente a 100% do intervalo total possível.

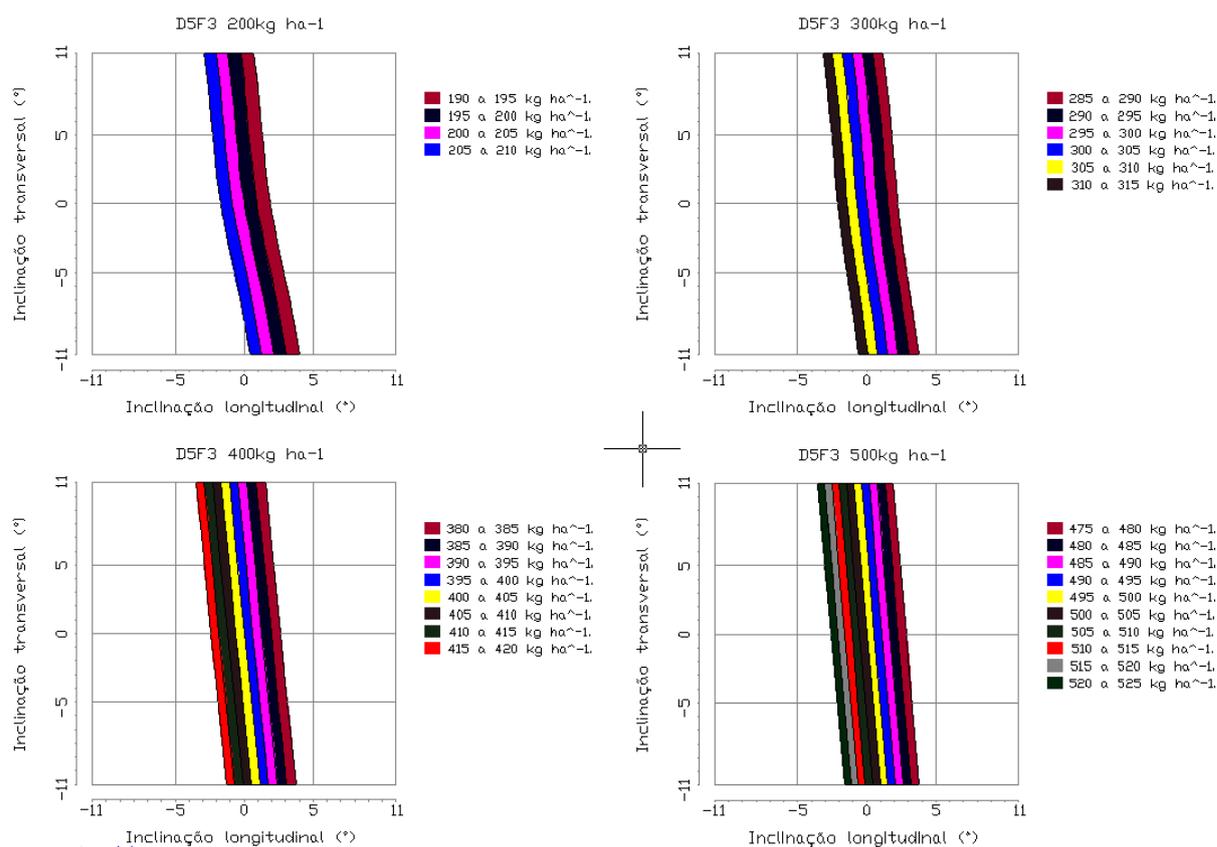


Figura 32 - Intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e fertilizante mistura de grânulos 05-20-20, a 6km h⁻¹ e espaçamento de 0,50m.

Tabela 68 - Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação com o dosador D5 e os três fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média
	200	300	400	500	
Mistura granulada	120,64	132,85	139,93	144,58	134,50
Mistura farelada	31,41	42,79	57,23	71,83	50,81
Mistura de Grânulos	78,88	95,56	110,58	120,19	101,30
Média	76,98	90,40	102,58	112,20	95,54

Tabela 69 – Áreas correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados para operação para todos dosadores e fertilizantes estudados nas doses de 200, 300, 400 e 500kg ha⁻¹.

Dosador	Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média (kg ha ⁻¹)
		200	300	400	500	
1	Mistura granulada	113,67	170,51	227,34	283,86	198,85
	Mistura farelada	484,00	484,00	484,00	484,00	484,00
	Mistura de Grânulos	182,43	224,49	253,75	275,26	233,98
2	Mistura granulada	152,55	166,77	175,52	178,65	168,37
	Mistura farelada	143,08	218,25	268,28	311,33	235,24
	Mistura de Grânulos	227,75	201,73	192,75	188,30	202,63
3	Mistura granulada	137,90	158,79	170,32	177,96	161,24
	Mistura farelada	69,97	89,77	104,97	116,89	95,40
	Mistura de Grânulos	138,29	167,69	187,64	202,06	173,92
4	Mistura granulada	41,95	65,60	88,74	115,31	77,90
	Mistura farelada	49,78	64,70	75,94	84,63	68,76
	Mistura de Grânulos	79,54	146,39	285,33	386,89	224,54
5	Mistura granulada	120,64	132,85	139,93	144,58	134,50
	Mistura farelada	31,41	42,79	57,23	71,83	50,81
	Mistura de Grânulos	78,88	95,56	110,58	120,19	101,30
Média (kg ha ⁻¹)		136,79	161,99	188,15	209,45	174,10

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Analisando a Tabela 69 é possível observar que o pior desempenho foi obtido pelo dosador D5 e fertilizante mistura farelada na dose de 200kg ha⁻¹, que ficou com área de apenas 6,49% do intervalo total possível. Desta forma, é possível constatar que tanto as disposições construtivas dos dosadores quando as propriedades físicas dos fertilizantes possuem diferentes influências quando ao efeito de inclinações longitudinais e transversais de trabalho, pois para nenhum dosador e tipo de fertilizante os valores foram iguais. As Tabela 70 e Tabela 71 apresentam as áreas médias correspondentes aos intervalos de inclinação em relação ao tipo de fertilizante e dosador utilizado.

Tabela 70 – Áreas médias correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação em função do tipo de fertilizante.

Fertilizante	Dose (kg ha ⁻¹)				Média (kg ha ⁻¹)
	200	300	400	500	
Mistura granulada	113,34	138,90	160,37	180,07	148,17
Mistura farelada	155,65	179,90	198,08	213,74	186,84
Mistura de Grânulos	141,38	167,17	206,01	234,54	187,28
Média (kg ha ⁻¹)	136,79	161,99	188,15	209,45	174,10

Analisando a Tabela 70 é possível constatar que o fertilizante que apresentou maior desempenho foi o mistura de grânulos 05-20-20, que na média das doses estudadas apresentou área correspondente a 38,69% do intervalo total possível. Os fertilizantes mistura farelada e mistura granulada tiveram intervalos correspondentes a 38,60% e 30,61%, respectivamente, do intervalo total possível. Já quanto ao tipo de dosador, Tabela 71, o melhor desempenho foi obtido pelo dosador D1, com área correspondente ao intervalo recomendado à operação de 63,14% do intervalo total possível.

Tabela 71 - Áreas médias correspondentes aos intervalos de inclinações longitudinais e transversais recomendados à operação em função do tipo de dosador.

Dosador	Dose (kg ha ⁻¹)				Média (kg ha ⁻¹)
	200	300	400	500	
D1	260,03	293,00	321,70	347,71	305,61
D2	174,46	195,58	212,18	226,09	202,08
D3	115,39	138,75	154,31	165,64	143,52
D4	57,09	92,23	150,00	195,61	123,73
D5	76,98	90,40	102,58	112,20	95,54

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

Contudo, como a utilização dos modelos tem o intuito de servir como ferramenta para o desenvolvimento de um sistema de controle da taxa de aplicação de fertilizantes, é necessário que os modelos sejam capazes de prever velocidades de acionamento que

corrijam os erros ocasionados pelas inclinações de trabalho. Na Tabela 72 são simuladas condições com diferentes inclinações longitudinais e transversais e as respectivas velocidades de acionamento que corrigem a taxa de aplicação, garantindo que seja atingida a dose desejada de 400kg ha^{-1} , para a velocidade de deslocamento de 6km h^{-1} e espaçamento entre linhas de $0,45\text{m}$.

Tabela 72 - Velocidades de acionamento para correção da taxa de aplicação de 400kg ha^{-1} , em diferentes inclinações de trabalho, velocidade de 6km h^{-1} e espaçamento de $0,45\text{m}$.

Dosador	Fertilizante	Inclinações de trabalho (°)															
		IL	IT	IL	IT	IL	IT	IL	IT	IL	IT	IL	IT	IL	IT	IL	IT
		0	0	-11	-11	-11	11	11	-11	0	-11	0	11	-11	0	11	0
1	F1	47,86	52,67	52,67	43,05	47,86	47,86	52,67	43,05								
	F2	31,28	31,93	31,93	30,65	31,28	31,28	31,93	30,65								
	F3	40,69	47,17	44,79	37,05	41,82	39,57	45,98	35,98								
2	F1	97,41	104,21	116,76	80,02	90,74	100,07	112,65	85,43								
	F2	34,51	45,91	45,91	42,70	40,93	40,93	38,98	36,72								
	F3	88,35	97,78	103,88	81,21	88,35	88,35	100,83	78,90								
3	F1	51,39	55,04	55,04	41,36	47,43	47,43	59,50	44,92								
	F2	30,15	35,92	31,44	13,95	32,14	28,16	33,68	12,16								
	F3	44,89	51,13	55,25	36,11	42,99	46,78	53,19	37,85								
4	F1	59,55	78,60	78,60	43,32	75,60	75,60	62,14	30,68								
	F2	30,35	31,45	31,45	9,49	30,35	30,35	31,45	9,49								
	F3	27,31	33,21	33,21	13,41	27,31	27,31	33,21	13,41								
5	F1	10,12	8,03	8,37	11,24	9,80	10,49	8,18	11,74								
	F2	4,02	NA*	NA	5,74	4,02	4,02	NA	6,49								
	F3	7,34	5,19	5,50	8,80	7,16	7,51	5,35	9,00								

*NA – Não apresenta.

Exceto para o dosador D5 e fertilizante mistura farelada, todos os demais modelos foram capazes de prever velocidades de acionamento capazes de ajustar a taxa de aplicação. Comprovando assim a sua viabilidade de uso como ferramenta para o desenvolvimento de dispositivos de controle eletrônico da taxa de aplicação. Para o dosador D5 e fertilizante mistura farelada, não foi possível ajustar a velocidade de acionamento, pois os desvios da taxa de aplicação ocasionados pelas inclinações de trabalho possuem elevada magnitude sendo este o dosador e fertilizante, entre os avaliados, o que apresentou o pior desempenho.

Com o intuito de facilitar a utilização dos modelos matemáticos, a Tabela 73 mostra, de forma generalizada, os modelos desenvolvidos para cada dosador e tipo de fertilizante. Os modelos matemáticos foram separados primeiramente por tipo de fertilizante e, em seguida pelo tipo de mecanismo dosador.

Na Tabela 73 é possível observar que os modelos são apresentados na forma de equações matemáticas nas quais a taxa de aplicação de fertilizante é dada em kg min^{-1} . Para que seja determinada a taxa de aplicação em kg ha^{-1} , os modelos devem ser ajustados para que seja considerada a velocidade de deslocamento e espaçamento entre linhas de cultivo. Os modelos que apresentam como resultado de saída a taxa de aplicação em kg ha^{-1} podem ser encontrados ao longo do texto nas Equações 8 a 23 ou, basta que as equações apresentadas na Tabela 73 sejam multiplicadas por $\left(\frac{6}{10 * \text{Velocidade de deslo.} * \text{Espaçamento}}\right)$.

Tabela 73 – Modelos matemáticos para todos dosadores e fertilizantes estudados.

Fertilizante	Dosador	Equação – Taxa de aplicação (kg min^{-1})
Mistura granulada	D1	$-106,58+17,42\text{IL}+39,84\text{R}$
	D2	$-19,73+2,93\text{IL}+1,25\text{IT}+0,35\text{IT}^2+18,68\text{R}+0,2\text{ILR}-0,1\text{ITR}$
	D3	$-25,89+4,73\text{IL}+1,16\text{IT}^2+35,53\text{R}+0,36\text{ILR}$
	D4	$-399,12+46,98\text{IL}+3,64\text{IL}^2-3,67\text{IT}^2+44,23\text{R}-0,12\text{R}^2$
	D5	$33,19-5,36\text{IL}+0,6\text{IL}^2+6,86\text{IT}+174,57\text{R}-2,29\text{ILR}-1,21\text{ITR}$
Mistura farelada	D1	$45,99+56,08\text{R}+0,1\text{ILR}$
	D2	$175,71-7,05\text{IL}-1,27\text{IL}^2-2,50\text{IT}^2+47,07\text{R}+0,31\text{ILR}$
	D3	$180,14+40,10\text{IL}+3,74\text{IL}^2+9,73\text{IT}+53,72\text{R}+0,54\text{ILR}$
	D4	$-196,48+46,23\text{IL}+6,32\text{IL}^2+65,77\text{R}+0,95\text{ILR}$
	D5	$602,85-134,21\text{IL}+6,12\text{IL}^2+298,13\text{R}-1,85\text{ILIT}$
Mistura de grânulos	D1	$-28,33+10,69\text{IL}+4,59\text{IT}+44,93\text{R}+0,24\text{ILR}$
	D2	$-9582-2,81\text{IL}+21,46\text{R}+0,47\text{ILIT}+0,27\text{ILR}$
	D3	$51,74+13,78\text{IL}-6,70\text{IT}+38,95\text{R}+0,29\text{ILR}$
	D4	$294,25+61,62\text{IL}+1,36\text{IL}^2+55,14\text{R}-0,51\text{ILR}$
	D5	$160,03-17,98\text{IL}+0,74\text{IL}^2-3,60\text{IT}+223,53\text{R}-2,67\text{ILR}$

D1 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal.

D2 – Dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral.

D3 – Dosador helicoidal com descarga por gravidade.

D4 – Dosador rotor acanalado.

D5 – Dosador disco estrela.

CONCLUSÕES

Nas condições experimentais estudadas, todos os modelos, segundo a análise de regressão, foram significativos e capazes de prever valores que corrigem a taxa de aplicação para maior parte dos dosadores e fertilizantes estudados. O que permite que os modelos matemáticos desenvolvidos através do DCCR possam ser empregados como ferramenta para o auxílio ao projeto de dispositivos de controle eletrônico da taxa de aplicação de fertilizantes em função de inclinações longitudinais, inclinações transversais e velocidades de acionamento.

Os coeficientes de determinação, R^2 , foram superiores a 0,9 para todos dosadores e fertilizantes estudados, sendo a média geral igual a 0,9945. O modelo matemático para o dosador helicoidal com descarga por transbordo transversal, D1, e fertilizante mistura de grânulos foi o que apresentou o maior coeficiente de determinação, 0,9995. O erro relativo médio dos modelos matemáticos foi inferior a 10% para todos os dosadores e fertilizantes, e sua média geral foi igual a 0,67%. O menor erro relativo foi observado para o dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral, D2, e fertilizante mistura farelada, 0,02%, o que confirma a segunda hipótese.

O efeito da interação entre inclinações longitudinais e transversais foi significativo apenas para os dosador rotor dentado, D5, e fertilizante mistura farelada e dosador helicoidal com descarga por transbordo lateral, D2, e fertilizante mistura de grânulos. O efeito da interação entre inclinações longitudinais e velocidades de acionamento foi significativo para 12 dos 15 modelos matemáticos desenvolvidos. A interação entre inclinações transversais e velocidades de acionamento foi significativa apenas para os dosadores, helicoidal com descarga por transbordo lateral, D2, e rotor acanalado, D4, com o fertilizante mistura granulada. Estes fatos evidenciam que o efeito das inclinações de trabalho sobre a taxa de aplicação é mais sensível às velocidades de acionamento do que entre inclinações longitudinais e transversais, recomendando-se, sempre que possível, operar com menores velocidades de acionamento para que se obtenha maior precisão.

Para grande parte dos modelos, o efeito das variáveis independentes foi linear, sendo então os maiores desvios da taxa de aplicação observados para as inclinações longitudinais e transversais, e velocidades de acionamento extremas, correspondentes aos valores codificados de $\pm 1,68$. Para o fertilizante mistura granulada 16-16-16 os dosadores helicoidal com descarga por transbordo lateral, D2, rotor acanalado, D4, e rotor dentado, D5, nas taxas de aplicação

mínimas, apresentaram efeitos não lineares, sendo então os valores diferentes dos extremos. Para o fertilizante mistura farelada 00-15-30 o mesmo efeito foi observado para os dosadores, helicoidal com descarga por gravidade, D3, e rotor acanalado, D4, somente nas inclinações longitudinais.

Através de simulações a partir dos modelos matemáticos foi possível determinar condições de operação recomendadas para cada dosador e tipo de fertilizante, nas quais os desvios da taxa de aplicação possuem erros toleráveis. Ou seja, os melhores parâmetros de operação quanto a variação da taxa de aplicação. Entre os dosadores estudados, o dosador D1, do tipo helicoidal com descarga por transbordo transversal, apresentou melhor desempenho para todos os fertilizantes e doses estudadas, comprovando a eficiência do seu sistema de dosagem e descarga de fertilizante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5776: Fertilizantes, corretivos e condicionadores de solo – Terminologia.** Rio de Janeiro, 1994a.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de norma 04: 015:06-004/1994 - Semeadora de precisão – ensaio de laboratório: método de ensaio.** Rio de Janeiro, 1994b.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Projeto de norma: 04:015:06-010/1996 – Semeadoras e distribuidoras de fertilizantes ou corretivos – terminologia: definições.** São Paulo, 1996.

AGROMAC. Fertisystem – O dosador. Passo Fundo, 2012. Disponível em: <<http://www.agromac.com.br/fertisystem/>>. Acesso em: 28 ago. 2012.

ALCARDE, J. C.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações.** São Paulo, ANDA, 1998, 35 p. n. 3 (Boletim Técnico, 3).

ANANTACHAR, M.; KUMAR, G. V. P.; GURUSWAMY, T. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 72, n. 2, p 87-98, mar. 2010.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. Indicadores. 2012. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.00.00&ver=por>> Acesso em: 22 ago. 2012.

BALASTREIRE, L. A. **Máquinas agrícolas.** 1 ed. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BONOTTO, G. J.; ALONÇO, A. dos S.; MONTEMEZZO JUNIOR, L.; LASSEN, P. G.; RIST, G. P. Desempenho de dosadores de fertilizantes do tipo rotor helicoidal em função de inclinações longitudinais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40. Cuiabá: Universidade Federal do Mato Grosso, jul. 2011, CD-ROM.

BONOTTO, G. J. **Desempenho de dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas.** 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

CAMACHO-TAMAYO, J. H.; BARBOSA, A. M.; PÉREZ, N. M.; LEIVA, F. R.; RODRÍGUEZ, G. A. Operational characteristics of four metering systems for agricultural fertilizers and amendments. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 605-613, out/dez. 2009.

CERRI, D. G. P. Desenvolvimento de um sistema de aplicação localizada de calcário a taxas variáveis. 2001. 90 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2001.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Custos de Produção**. 2010. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=545&t=>>>. Acesso em: 22 ago. 2012.

DACANAL, G. C.; MENEGALLI, F. C. Selection of operational parameters for the production of instant soy protein isolate by pulsed agglomeration. **Powder Technology**, v. 203, n. 3, p. 565-573. nov. 2010.

DE MORI, C. **Estimativas de custo de produção de trigo e de aveia - safra 2007**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2007. 6 p. (Embrapa Trigo. Comunicado Técnico Online, 207). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/co/p_co207.htm> Acesso em: 17 de jul. de 2012.

EMBRAPA. Agência de informação EMBRAPA feijão. Plantio direto. Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/feijao/arvore/CONTAG01_102_1311200215105.html> Acesso em: 05 set. 2012.

FAO. How to Feed the World in 2050. **High Level Expert Forum**. Rome, 2009.

FAOSTAT – Population. Rome, 2012a. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/550/DesktopDefault.aspx?PageID=550#ancor>>. Acesso em: 23 ago. 2012.

FAOSTAT – Production, Crops. 2012b. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/home/index.html#DOWNLOAD>> Acesso em: 23 ago. 2012.

FERREIRA, M. F. P.; DIAS, V. de O.; OLIVEIRA, A.; ALONÇO, A. dos S.; BAUMHARDT, U. B. Uniformidade de vazão de fertilizantes por dosadores helicoidais em função do nivelamento longitudinal. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 4, p. 297-304, jul./ago. 2010.

FRANCETTO, T. R.; DAGIOS, R. F.; FERREIRA, M. F.; ALONÇO, A dos S. Mecanismos dosadores de sementes e fertilizantes presentes nas semeadoras-adubadoras de precisão no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 41. Londrina: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola – SBEA, jul. 2012, CD-ROM.

GAONA, H. B. M. O uso da simulação para avaliar mudanças organizacionais na produção. 1995. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

GARCIA, A. P. **Desenvolvimento de um sistema de controle eletro-mecânico para dosador de fertilizantes.** 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

GARCIA, A. P.; UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L.; RUSSO, E. Caracterização de um mecanismo dosador helicoidal de fertilizantes sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 35. João Pessoa: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, ago. 2006, CD-ROM.

GARCIA, A. P. **Sistemas de controle fuzzy para dosadores helicoidais de fertilizantes com acionamento elétrico.** 2011. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2011.

GONÇALVES JR., A. C.; NACKE, H.; STREY, L.; SCHWANTES, D.; SELZLEIN, C. Produtividade e componentes de produção do milho adubado com Cu e NPK em um argissolo. *Scientia Agraria*, Curitiba, v. 9, n. 1, p. 35-40, 2008.

GONÇALVES JR., A. C.; TRAUTMANN, R. R.; MARENGON, N. G.; RIBEIRO, O. L.; SANTOS, A. L. Produtividade de milho em resposta a adubação com NPK e Zn em argissolo vermelho-amarelo eutroférico e latossolo vermelho eutroférico. *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1231-1236, jul./ago., 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produção Agrícola Municipal. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=1&op=0&vcodigo=PA3&t=lavoura-temporaria-quantidade-produzida>>. Acesso em: 20 mar. 2013.

IFA – International Fertilizer Industry Association. World Fertilizer Consumption. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata>>. Acesso em: 26 mar. 2013.

IMEA – Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Custo de Produção de Algodão – Safra 12/13.** 2012c. Disponível em:

<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/2012_06_CPAIgodao.pdf> Acesso em: 17 jul. 2012.

IMEA – Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Custo de Produção de Milho – Safra 12/13**. 2012a. Disponível em:

<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/2012_06_CPMilho.pdf> Acesso em: 17 jul. 2012.

IMEA – Instituto Mato-grossense de Economia Agropecuária. **Custo de Produção de Soja – Safra 12/13**. 2012b. Disponível em:

<http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/2012_06_CPSoja.pdf> Acesso em: 17 jul. 2012.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. **Custo de produção: Safra 2010/11**. 2011.

Disponível em:

<http://www3.irga.rs.gov.br/uploads/anexos/1293728428Custos_de_Producao.pdf> Acesso em: 17 jul. 2012.

ISHERWOOD, K. F. **Mineral Fertilizer use and the environment**. Paris, IFA, 1998, 61 p.

JOHN DEERE BRASIL S.A.. Eleandro Tomelero. Sistema dosador de fertilizante sólido. Int. CI A01C 15/16. BR n. PI 0400933-9 A. **PatentesOnline.com.br**. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.patentesonline.com.br/sistema-dosador-de-fertilizante-solido-100568.html>>. Acesso em: 05 set. 2012.

KARAYEL, D.; BARUT, Z. B.; ÖZMERZI, A. Mathematical modelling of vacuum pressure on a precision seeder. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 4, p. 437-444, abr. 2004.

LEINDECKER, J. A.; DAGIOS, R. F.; PRADE, R.; FRANCETTO, T. R.; FRANTZ, U. G. Nível tecnológico dos mecanismos dosadores de fertilizante empregados nas semeadoras adubadoras em linhas de precisão. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17. Santa Cruz do Sul: Universidade de Santa Cruz do Sul, out. 2011, CD-ROM.

LOPES, A. J. O que é um algoritmo? Revista Nova Escola, n. 238. São Paulo, 2010.

Disponível em: <<http://revistaescola.abril.com.br/matematica/pratica-pedagogica/algoritmo-611956.shtml>>. Acesso em: 28 ago. 2012.

MILMAN, M. J. Equipamentos para pré-processamento de grãos. 1 ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária – UFPel, 2002. 209p.

MOREIRA, L. J. B.; ALONÇO, A. dos S.; BONOTTO, G. J.; BELLÉ, M. P.; BEDIN, P. R.; ALTMANN, A. S. BANFERTI II: Bancada para testes com dosadores de fertilizantes de semeadoras-adubadoras em linhas. In: CONGRESSO SUL-AMERICANO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO E MÁQUINAS PRECISAS, 1. Não-me-Toque: Cooperativa Agropecuária e Industrial - Cotrijal, set. 2011, CD-ROM.

NAVA, I. A.; GONÇALVES JR., A. C.; GUERINI, V. L.; NACKE, H.; SCHWANTES, D. Efeito agroeconômico de adubos formulados contendo zinco de diferentes marcas comerciais no cultivo da soja em um Latossolo vermelho. *Scientia Agraria Paranaensis*, Curitiba, v. 10, n. 3, p. 32-44, 2011.

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

OWEN, P. J.; CLEARY, P. W. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM). **Powder Technology**, v. 193, n. 3, p. 274-288, ago. 2009.

PERES, L. E. P. Nutrição Mineral de Plantas. Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAUAU8oAF/nutricao-mineral-plantas>>. Acesso em: 27 ago. 2012.

PÖRSCH, M. R. M. H. **Modelagem matemática e controle proporcional de uma bancada acionada pneumáticamente para simulação de terrenos inclinados**. 2012. 80 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2012.

RODRIGUES, M. A.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2 ed. Campinas, Cárita, 2009. 358p.

ROSSATO, F. P.; MACHADO, O. D. da C.; ALONÇO, A. dos S.; FRANCK, C. J.; FRANCETTO, T. R. Rendimento potencializado. *Cultivar Máquinas*, v. 122, p. 10-13, set. 2012.

SHIMIZU, Y.; CUNDALL, P. A. Three-dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 127, n. 9, p. 864-872, set. 2001.

SILVA, F. S. da; CORRÊA, P. C.; CALIL-JUNIOR, C.; GOMES, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2006.

SILVA, M. R. da. **Classificação de semeadoras-adubadoras de precisão para o sistema plantio direto conforme o índice de adequação.** 2003. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

TFI - The Fertilizer Institute. Annual Report 2011. 2011. 27 p.

TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.E. Efeito da camada filtrante na perda de carga de filtros de areia. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15., 2005, Teresina. Anais... Brasília: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 2005. v.1, p.1-6. 2005.

TROEH, F. R.; THOMPSON, L. M. **Solos e Fertilidade do Solo.** 6 ed. São Paulo, Andrei, 2007. 718 p.

UMEZU, C.K. **Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis.** 2003. 171 f. Tese (Doutorado em Máquinas Agrícolas) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. CFW 10 – Inversor de frequência. Jaguará do Sul, 2012. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW10-Inversor-de-Frequencia#>>. Acesso em: 06 set. 2012.

WERNER, V. **Análise econômica e experiência comparativa entre agricultura de precisão e tradicional.** 2007. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

YUAN, J.; LIU, C. L.; LI, Y. M.; ZENG, Q.; ZHA, X. F. Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 70, n. 1, p. 33-41, jan. 2010.

ZANOTTO, D. L.; GUIDONI, A. L.; PIENIZ, L. C. Granulometria do milho em rações para engorda de suínos. Instrução técnica para o suinocultor. EMBRAPA Suínos e Aves. n. 9. p. 1-2, mar. 1999.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Reparametrização dos modelos matemáticos codificados

Tabela 74 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D1 e fertilizante mistura granulada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	2881,289	45,04132	0,000000
IL	114,077	27,29988	0,002381
IL ²	22,374	27,33665	0,434225
IT	36,110	27,29988	0,218546
IT ²	30,878	27,33665	0,287879
R	1185,618	27,29988	0,000000
R ²	55,325	27,33665	0,073665
ILIT	21,750	35,65327	0,556921
ILR	9,250	35,65327	0,801130
ITR	61,750	35,65327	0,117324

Tabela 75 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D1 e fertilizante mistura farelada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	4251,837	119,0322	0,000000
IL	150,293	144,2926	0,066920
IL ²	144,583	144,4869	0,076388
IT	-58,197	144,2926	0,440665
IT ²	92,854	144,4869	0,230776
R	1668,926	144,2926	0,000000
R ²	92,146	144,4869	0,234073
ILIT	152,500	188,4442	0,140005
ILR	240,000	188,4442	0,031340
ITR	206,000	188,4442	0,056588

Tabela 76 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D1 e fertilizante mistura de grânulos.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	3341,513	11,95489	0,000000
IL	186,580	7,24595	0,000000
IL ²	-12,895	7,25570	0,109247
IT	30,060	7,24595	0,002490
IT ²	7,300	7,25570	0,340630
R	1337,189	7,24595	0,000000
R ²	3,049	7,25570	0,684221
ILIT	-20,750	9,46311	0,056001
ILR	46,250	9,46311	0,000863
ITR	1,750	9,46311	0,857385

Tabela 77 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D2 e fertilizante mistura granulada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	1381,4059	7,9741	0,0000
IL	119,3187	4,8331	0,0000
IL ²	10,3905	4,8396	0,0603
IT	-39,0303	4,8331	0,0000
IT ²	14,9965	4,8396	0,0127
R	555,9862	4,8331	0,0000
R ²	-6,9706	4,8396	0,1836
ILIT	7,2500	6,3120	0,2803
ILR	39,7500	6,3120	0,0001
ITR	-18,7500	6,3120	0,0157

Tabela 78 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D2 e fertilizante mistura farelada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	3705,672	23,32318	0,000000
IL	108,179	14,13635	0,000032
IL²	-54,319	14,15539	0,003983
IT	21,418	14,13635	0,164054
IT²	-107,111	14,15539	0,000034
R	1400,733	14,13635	0,000000
R ²	-28,809	14,15539	0,072328
ILIT	-12,250	18,46188	0,523622
ILR	61,250	18,46188	0,008974
ITR	-14,750	18,46188	0,444895

Tabela 79 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D2 e fertilizante mistura de grânulos.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	1513,496	10,78655	0,000000
IL	113,872	6,53781	0,000000
IL ²	-5,810	6,54661	0,397894
IT	-7,833	6,53781	0,261472
IT ²	3,756	6,54661	0,580197
R	638,591	6,53781	0,000000
R ²	11,551	6,54661	0,111487
ILIT	20,000	8,53829	0,043848
ILR	52,500	8,53829	0,000169
ITR	1,500	8,53829	0,864435

Tabela 80 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D3 e fertilizante mistura granulada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	2638,626	24,03861	0,000000
IL	207,980	14,56998	0,000000
IL ²	32,849	14,58960	0,050874
IT	-28,137	14,56998	0,085516
IT ²	49,856	14,58960	0,007661
R	1057,299	14,56998	0,000000
R ²	-2,227	14,58960	0,882029
ILIT	-0,250	19,02819	0,989804
ILR	70,250	19,02819	0,004983
ITR	-0,750	19,02819	0,969420

Tabela 81 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D3 e fertilizante mistura farelada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	4209,347	44,07466	0,000000
IL	529,690	26,71398	0,000000
IL²	160,517	26,74996	0,000202
IT	63,708	26,71398	0,040904
IT ²	52,453	26,74996	0,081532
R	1598,827	26,71398	0,000000
R ²	31,549	26,74996	0,268478
ILIT	28,000	34,88809	0,442902
ILR	106,000	34,88809	0,014057
ITR	13,000	34,88809	0,718055

Tabela 82 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D3 e fertilizante mistura de grânulos.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	2972,946	14,10120	0,000000
IL	234,492	8,54684	0,000000
IL ²	14,937	8,55835	0,114894
IT	-43,861	8,54684	0,000618
IT ²	-3,842	8,55835	0,664134
R	1159,164	8,54684	0,000000
R ²	15,291	8,55835	0,107635
ILIT	-8,750	11,16206	0,453231
ILR	57,250	11,16206	0,000620
ITR	-5,250	11,16206	0,649299

Tabela 83 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D4 e fertilizante mistura granulada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	2228,724	78,45199	0,000000
IL	307,686	47,55033	0,000115
IL²	156,155	47,61437	0,009536
IT	63,878	47,55033	0,212040
IT²	-157,408	47,61437	0,009143
R	769,307	47,55033	0,000000
R²	-108,514	47,61437	0,048641
ILIT	18,750	62,10008	0,769565
ILR	103,250	62,10008	0,130748
ITR	41,750	62,10008	0,518277

Tabela 84 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D4 e fertilizante mistura farelada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	4736,560	75,42340	0,000000
IL	768,914	45,71468	0,000000
IL²	270,959	45,77625	0,000224
IT	1,149	45,71468	0,980494
IT ²	48,807	45,77625	0,314093
R	1957,458	45,71468	0,000000
R ²	76,089	45,77625	0,130838
ILIT	19,500	59,70274	0,751424
ILR	185,000	59,70274	0,012749
ITR	11,000	59,70274	0,857905

Tabela 85 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D4 e fertilizante mistura de grânulos.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	4429,385	35,20900	0,000000
IL	150,920	21,34044	0,000058
IL²	58,334	21,36917	0,023232
IT	-33,625	21,34044	0,149566
IT ²	-44,062	21,36917	0,069264
R	1640,860	21,34044	0,000000
R ²	-46,542	21,36917	0,057362
ILIT	-100,250	27,87031	0,005775
ILR	31,250	27,87031	0,291200
ITR	-5,250	27,87031	0,854764

Tabela 86 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D5 e fertilizante mistura granulada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	1805,011	10,43954	0,000000
IL	-187,477	6,32749	0,000000
IL²	25,964	6,33601	0,002685
IT	-35,659	6,32749	0,000319
IT ²	-3,089	6,33601	0,637554
R	703,928	6,32749	0,000000
R ²	-11,238	6,33601	0,109870
ILIT	-7,000	8,26361	0,418901
ILR	-60,500	8,26361	0,000045
ITR	-32,000	8,26361	0,003775

Tabela 87 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D5 e fertilizante mistura farelada.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	3628,794	42,36629	0,000000
IL	-878,958	25,67852	0,000000
IL²	262,567	25,71310	0,000003
IT	-11,568	25,67852	0,663017
IT ²	22,346	25,71310	0,407391
R	1202,163	25,67852	0,000000
R ²	-6,353	25,71310	0,810405
ILIT	-79,250	33,53580	0,042382
ILR	-65,250	33,53580	0,083544
ITR	-27,750	33,53580	0,429362

Tabela 88 - Reparametrização do modelo matemático do dosador D5 e fertilizante mistura de grânulos.

Fator	Coef. de regressão	Erro padrão	ρ
Média	2428,818	11,73446	0,000000
IL	-295,333	7,11234	0,000000
IL²	32,179	7,12192	0,001450
IT	-23,558	7,11234	0,009052
IT ²	-11,401	7,12192	0,143886
R	901,372	7,11234	0,000000
R ²	-10,338	7,12192	0,180576
ILIT	-12,000	9,28862	0,228577
ILR	-70,500	9,28862	0,000034
ITR	-15,500	9,28862	0,129519