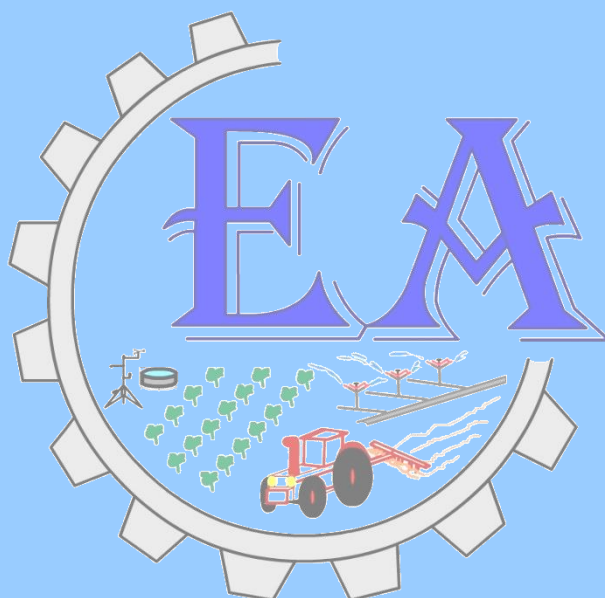




**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Edmo Henrique Martins Cavalcante

**Modelagem multinível da demanda energética de
semeadoras-adubadoras**



JUAZEIRO – BA
2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

Edmo Henrique Martins Cavalcante

**Modelagem multinível da demanda energética de
semeadoras-adubadoras**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, Campus Juazeiro, como requisito da obtenção de título de mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Mariano Leite.
Co-orientadores: Prof. Dr. Marconi Ribeiro Furtado Júnior e Prof. Dr. Hugo Colombarolli Bonfá.

JUAZEIRO – BA
2018

	Cavalcante, Edmo Henrique Martins.
C376m	Modelagem multinível da demanda energética de semeadoras-adubadoras/ Edmo Henrique Martins Cavalcante. -- Juazeiro, 2018. xiv, 68 f. : il. ; 29 cm
	Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Vale do São Francisco, Campus Juazeiro, 2018.
	Orientador: Prof. Dr. Daniel Mariano Leite.
	1. Máquinas agrícolas. 2. Semeadoras. 3. Adubadoras I. Título. II. Leite, Daniel Mariano. III. Universidade Federal do Vale do São Francisco
	CDD 631.3

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Integrado de Biblioteca SIBI/UNIVASF
Bibliotecário: Renato Marques Alves

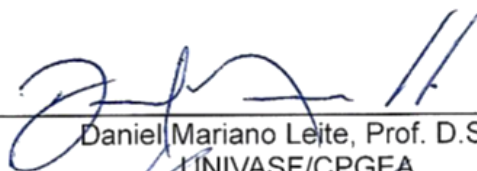
UNIVERSIDADE FEDERAL DO VALE DO SÃO FRANCISCO
MESTRADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FOLHA DE APROVAÇÃO

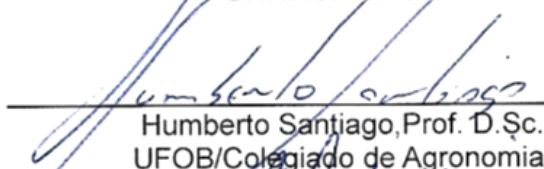
Edmo Henrique Martins Cavalcante

**“MODELAGEM MULTINÍVEL DA DEMANDA ENERGÉTICA DE
SEMEADORAS-ADUBADORAS”**

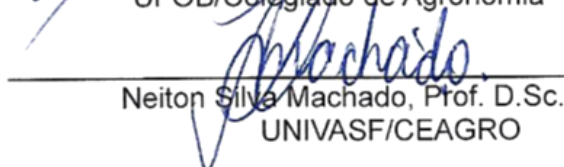
Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação *Strito Sensu* em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF, como requisito parcial para obtenção do título de mestre.



Daniel Mariano Leite, Prof. D.Sc.
UNIVASF/CPGEA



Humberto Santiago, Prof. D. Sc.
UFOB/Colegiado de Agronomia



Neiton Silva Machado, Prof. D.Sc.
UNIVASF/CEAGRO

Juazeiro-BA, 28 de Março de 2018.

Ao meu pai, Everaldo Macedo Cavalcante (*In memoriam*).

À professora Gloria Chen (*In memoriam*).

AGRADECIMENTOS

À Deus por me permitir sonhar e realizar.

Aos orientadores Daniel Leite, Hugo Bonfá e Marconi Furtado pelo interesse e dedicação demonstrados durante toda realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, Neiton Machado e Humberto Santiago, por sua disponibilidade e contribuições pessoais neste trabalho.

Aos meus amigos por me acompanharem e me incentivarem.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

À Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF) pela realização do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola.

Aos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), Jeysa Sousa e Vitor Boson.

All models are wrong, but some are useful.

George Box
Estatístico

CAVALCANTE, E.H.M. Modelagem multinível da demanda energética de semeadoras-adubadoras. 2018. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.

RESUMO

A demanda crescente por alimentos se tornou um dos mais importantes desafios para a humanidade e, para tanto, o trabalho realizado pelas máquinas agrícolas e seu desempenho energético e operacional tem recebido grande atenção. Nas operações de semeadura, em particular, diversos fatores interferem no sucesso da implantação da cultura, incluindo aqueles relacionados às falhas na distribuição e aos danos mecânicos nas sementes. Esses fatores podem resultar no estande reduzido de plantas, no comprometimento da lavoura e na elevação dos custos de produção. O aumento da capacidade operacional, por sua vez, depende do melhor uso da energia, quer pelo melhor aproveitamento do esforço de tração, quer pela escolha da velocidade ótima de trabalho para o conjunto mecanizado. A demanda energética de semeadoras-adubadoras é frequentemente relatada na literatura e seus resultados descrevem o comportamento da força, potência e consumo de combustível segundo as condições específicas da área experimental. Este trabalho teve por finalidade a análise de modelos lineares de efeito misto gerados por máxima verossimilhança, a partir de um conjunto de dados oriundos de uma revisão sistemática que considerou representações quantitativas acerca da operação de semeadoras. Para isso, foram avaliadas diversas variáveis dos experimentos disponíveis na literatura, notadamente os atributos do solo, com a finalidade de reduzir a variabilidade nas previsões de demanda de força, potência e consumo horário em condições experimentais diversas. A qualidade dos modelos foi avaliada através de critérios de informação, além de avaliadores como erro padrão da estimativa e coeficiente de determinação ajustado. O trabalho possibilitou ainda compreender a correlação entre as variáveis estudadas e sua influência sobre a demanda de esforço de tração nas operações de semeadura, além da potência e do consumo horário. Observou-se também que os melhores modelos segundo os critérios de informação nem sempre atendem aos pressupostos de normalidade e homocedasticidade dos resíduos. Futuros trabalhos poderão analisar ainda a reaplicabilidade dos modelos para diferentes semeadoras em diferentes regulagens e condições de operação.

Palavras-chave: meta-análise, força de tração, potência, consumo horário, ASABE.

CAVALCANTE, E.H.M. Multilevel modeling of the energy demand of seeder-fertilizer. 2018. 82p. Dissertation (Master's in Agricultural Engineering) – Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, 2018.

ABSTRACT

The growing demand for food became the major challenge facing mankind and, therefore, the work done by agricultural machines and their energetic and operational performance has received greater attention. Particularly in sowing operations, different factors hinder the success of the cultivation, comprising the ones related to the failures in seed placement and the mechanical damage to seeds. Those factors may result in reduced stand of plants, crop impairment and soaring production costs. The increase of the operational capacity, in turn, relies on better energy use, either by the better utilization of tractive effort or by setting optimum speed of the seeding assembly. The energy demand seeder-fertilizer is frequently reported in the literature and its results depicts the draft force, power and fuel consumption variations under specific conditions of the experimental area. This work aimed at analysis of linear mixed-effect models generated by maximum likelihood method with a dataset from a systematic review that comprised quantitative representations concerning the operation of seeders. In this regard, many variables from experiments, mostly soil characteristics, reported in the literature were assessed in order to reduce the variability of the in predictions of draft and power requirements as well as hourly consumption in various experimental conditions. The model quality was assessed through information criteria and some ratios such as mean square error and adjusted coefficient of determination. This work also enabled to apprehend the correlation among the variables and their effects over of draft and power requirements as well as hourly consumption in sowing operations. It was also found that the best models according to information criteria may not always meet the assumptions as normality of the distribution of residuals and homoscedasticity. Forthcoming works may analyses repeatability of the models considering different seeders under diverse configurations and operating conditions.

Keywords: meta-analysis, draft force, power, hourly fuel consumption, ASABE.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Capacidades de trabalho associados aos elementos de tempo.	22
Figura 2 – Princípio da parcimônia.....	30
Gráfico 1 – Distribuição de frequência dos trabalhos selecionados.	43
Gráfico 2 – Valores previstos e observados de tração média.	48
Gráfico 3 – AICc mínimo em função do número de parâmetros.....	52
Gráfico 4 – Histograma de resíduos.....	55
Gráfico 5 – Resíduos do modelo F323.....	55
Gráfico 6 – Quantil-quantil da normal para o modelo F323.	56
Gráfico 7 – Histograma do modelo F8150.....	60
Gráfico 8 – Gráfico dos resíduos do modelo F8150.	60
Gráfico 9 – Resíduos do modelo C437.	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros relacionados à máquina e ao solo.	40
Tabela 2 – Medidas de dispersão das variáveis selecionadas.	44
Tabela 3 – Número de modelos em função do número de parâmetros.	45
Tabela 4 – Matriz de correlação.	49
Tabela 5 – Coeficientes dos modelos de força específica.	53
Tabela 6 – Avaliadores dos modelos de força específica.	54
Tabela 7 – Modelos de força específica com resíduos normalmente distribuídos. ...	57
Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de força específica com interação.	58
Tabela 9 – Avaliadores dos modelos de força específica com interação.	58
Tabela 10 – Modelos de consumo com resíduos normalmente distribuídos.	61
Tabela 11 – Coeficientes dos modelos de consumo horário.	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIC	Critério de Informação de Akaike
AICc	Critério de Informação de Akaike Corrigido
ARE	Teor de areia
ARG	Teor de argila
BIC	Critério de Informação Bayesiano
CONH	Consumo horário de combustível ($L.h^{-1}$)
D	Força de tração requerida pelo implemento (kN)
DEN	Densidade do solo ($Mg.m^{-3}$);
F	Parâmetro de ajuste da textura do solo
k	Número de parâmetros do modelo
LCS	Ausência de correlação positiva ponderada pelos desvios padrões
MSE	Erro Padrão da Estimativa
MSEP	Erro Quadrático Médio de Previsão
MSV	Variância quadrática média
n	Número de observações
R_{aj}^2	Coeficiente de Determinação Ajustado
SB	Quadrado do viés
SDSD	Diferença entre o desvio-padrão das observações e o desvio-padrão das previsões
SIL	Teor de silte
UMI	Teor de água no solo
RCUL	Resíduos culturais de superfície ($t.ha^{-1}$)
RPEN	Resistência do solo à penetração (MPa)
PADU	Profundidade de deposição do adubo (cm)
VEL	Velocidade do conjunto mecanizado ($km.h^{-1}$)
FLIN	Força de tração específica ($kN.linha^{-1}$)
T	Profundidade de trabalho (cm)
W	Largura da máquina (m) ou número de elementos ativos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 MÁQUINAS DE SEMEADURA.....	16
2.1.1 Discos de Corte de Palhada.....	18
2.1.2 Mecanismos Sulcadores	19
2.2 DESEMPENHO OPERACIONAL	20
2.2.1 Capacidade e Eficiência de Trabalho.....	21
2.2.2 Velocidade	22
2.2.3 Força de Tração.....	23
2.2.4 Consumo de Combustível.....	24
2.3 MODELAGEM	25
2.3.1 Meta-Análise	26
2.3.1.1 Modelos Lineares de Efeito Fixo	27
2.3.1.2 Modelos Lineares de Efeito Aleatório.....	27
2.3.1.3 Modelos Lineares de Efeito Misto	27
2.3.2 Avaliadores e Teorias da Informação.....	29
2.3.2.1 Erro Padrão da Estimativa	31
2.3.2.2 Erro Quadrático Médio de Previsão	33
2.3.2.3 Coeficiente de Determinação Ajustado	34
2.3.2.4 Critério de Informação de Akaike	35
2.3.2.5 Critério de Informação de Akaike Corrigido.....	38
2.3.2.6 Critério de Informação Bayesiano	39
2.4 MODELO DA ASABE	39
3. MATERIAL E MÉTODOS	42
3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA.....	42
3.2 MODELAGEM	44
3.2.1 Força de Tração Média	45
3.2.2 Potência Média	45
3.2.3 Consumo Horário de Combustível	46
3.3 ANÁLISE E SELEÇÃO DE MODELOS	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 MODELO DA ASABE	47
4.2 ESTIMATIVA DE FORÇA DE TRAÇÃO.....	49

4.2.1	Relação entre as Variáveis	49
4.2.2	Modelagem da Força Específica de Tração.....	52
4.2.2.1	Modelos sem Interação.....	52
4.2.2.2	Diagnósticos de Regressão	54
4.2.2.3	Modelos com Interação de Termos Variáveis	57
4.2.3	Modelagem do Consumo de Combustível	60
4.2.3.1	Modelos sem Interação.....	60
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65
	ANEXO A – PUBLICAÇÕES SELECIONADAS	75
	ANEXO B – EQUAÇÕES DE FORÇA ESPECÍFICA	80

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de produção de alimentos tem se tornado um dos mais importantes desafios para a humanidade, demandando o desenvolvimento de novos equipamentos que incrementem a qualidade das operações agrícolas. No contexto da modernização, a semeadura foi uma das primeiras operações agrícolas a participar desse processo.

No Brasil, a produção de grãos responde por relevante parcela do produto interno, notadamente a produção de milho que responde por aproximadamente 42% de toda produção nacional de grãos (CONAB, 2018). Sua cadeia produtiva está fundamentalmente associada à indústria de alimentos, sendo o milho o insumo básico da avicultura e suinocultura. O mercado, contudo, tem verificado preços ascendentes e menores estoques de passagem.

Diante disso, entende-se que a crescente demanda pela matéria-prima se traduz avaliação contínua dos manejos e implementos utilizados na lavoura no intuito de se obterem incrementos na produtividade. O produtor deve ainda dimensionar e utilizar adequadamente máquinas e implementos para alcançar melhor desempenho operacional.

Esse desempenho envolve não somente melhor aproveitamento da energia, mas também o aumento da capacidade efetiva de trabalho, o qual está diretamente relacionado com o número de linhas e a velocidade de operação. A velocidade, no entanto, é um fator limitante sobretudo em semeadoras que utilizam dosadores mecânicos. A velocidade periférica do disco dosador afeta o desempenho agrônômico devido aos danos causados às sementes, bem como às falhas na sua distribuição.

O aumento do número de linhas nas semeadoras resulta no aumento na demanda do esforço necessário para tracioná-las. A ASABE (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*), por meio de norma técnica, apresenta uma equação para estimar a força de tração requerida por semeadoras. Essa estimativa baseia-se no número de linhas, bem na classificação textural do solo.

O modelo proposto pela ASABE, no entanto, apresenta grande variabilidade por considerar apenas condições gerais de solo. Dependendo do manejo adotado, diferenças na densidade, resistência ao cisalhamento, além da presença de restos culturais na superfície, pode haver diferentes comportamentos da máquina nas operações de semeadura.

Além disso, a tabela de parâmetros para utilização do referido modelo apresenta inconvenientes. Esses valores são oriundos de pesquisas realizadas em solos estadunidenses, não se podendo garantir a mesma precisão ao prever a força de tração em solos tipicamente brasileiros.

Diante disso, o presente trabalho teve por finalidade modelar a força de tração e a potência requerida por semeadoras-adubadoras, além do consumo horário de combustível no trator, considerando sobremaneira o efeito dos atributos do solo e das regulagens utilizadas. Esses efeitos foram considerados fixos ao passo que os experimentos que forneceram as observações tiveram efeito aleatório.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MÁQUINAS DE SEMEADURA

Semeadoras são máquinas agrícolas que dosam e depositam sementes no solo. Se a máquina realiza essas operações enquanto as fazem também para os adubos ou fertilizantes, pode-se denominá-la de semeadora-adubadora (BALASTREIRE, 1987).

Essas máquinas podem ser classificadas segundo as formas de distribuição das sementes, de acionamento e de acoplamento. Mialhe (2012) distingue duas formas de distribuição em relação à superfície do terreno: a semeadura a lanço e a semeadura em linha. Na primeira, sementes pequenas e de alta lotação são lançadas aleatoriamente de máquinas de solo ou de aeronave agrícola (semeadura a lanço) ou ainda lançadas à pequena altura originando rastilhos na superfície do terreno (semeadura em rastilho). Na semeadura em linha, as sementes são dispostas alinhadamente podendo ser lançadas individualmente no solo onde podem se distribuir quer linearmente ao acaso (semeadura em linhas) quer em intervalos fixos (semeadura de precisão) ao longo de sulcos paralelos (MIALHE, 2012).

Nesse tipo de semeadora, a regularidade da deposição de sementes é essencial para um estande adequado de plantas. De fato, os espaçamentos entre plântulas são influenciados pelas condições de solo e pelo potencial de germinação das sementes (LAN *et al.*, 1999). O mecanismo dosador pode ainda ocasionar espaçamentos falhos por não conseguir capturar a semente e realizar a adequada deposição no sulco (KACHMAN; SMITH, 1995).

Além disso, menores velocidades tangenciais do elemento rotativo do dosador normalmente resultam em melhor qualidade de semeadura por favorecer um melhor preenchimento dos alvéolos, reduzindo a ocorrência de espaçamentos múltiplos (CASÃO JÚNIOR *et al.*, 2000). O processo de separação e manuseio de sementes por dosadores puramente mecânicos são mais sensíveis à variações na uniformidade e forma das sementes quando comparados aos dosadores pneumáticos, devido ao princípio de dosagem utilizado (BALASTREIRE, 1987).

A desuniformidade da cultura pode ser ainda avaliada em termos de distribuição no plano vertical, de profundidade de deposição de semente no solo (KARAYEL; ÖZMERZI, 2008). Segundo Reis *et al.* (2007), maior tempo de emergência resultante da inadequada profundidade de deposição de sementes torna a plântula mais suscetível ao ataque de pragas presentes no solo. Nisso, Liu *et al.* (2004) verificaram que a uniformidade de emergência possui maior correlação com a produtividade se comparada com o espaçamento entre as plantas na linha.

Assim sendo, é oportuno frisar algumas características operacionais de uma semeadora que são importantes para a qualidade de semeadura. Portella (2001) cita a capacidade de a máquina poder garantir uma semeadura uniforme, mesmo com uma velocidade variável; manter a integridade física das sementes; semear diferentes espécies e culturas, além de ser durável, de fácil manejo, regulagens e manutenção. Esses requisitos, somados à heterogeneidade da agricultura brasileira, traduzem-se na diversidade de equipamentos para operações de semeadura com o objetivo de atender diferentes demandas dos agricultores (SILVA, 2003).

Quanto à forma de acionamento, as semeadoras podem ser manuais, de tração animal, motorizadas e tratorizadas. As semeadoras manuais são acionadas pelo operador ao passo que as de tração animal, no Brasil, normalmente são tracionadas por mulas ou bois. As semeadoras motorizadas possuem motor de combustão interna independente, podendo o conjunto ser montado em qualquer meio de deslocamento (BALASTREIRE, 1987).

As semeadoras tratorizadas são acionadas e tracionadas por tratores agrícolas, podendo distinguir três formas de acoplamento. Podem ser montadas, quando o acoplamento é feito no sistema de levante hidráulico de três pontos do trator; semimontadas, quando o engate é feito nos dois pontos inferiores desse sistema; e as semeadoras de arrasto, quando o acoplamento é feito na barra de tração do trator (BALASTREIRE, 1987). Este último é apontado por Silva (2003) como o modelo mais comumente utilizado no Brasil em razão, entre outras, do melhor controle da profundidade de trabalho e menor esforço do sistema hidráulico dos tratores.

As condições de solos não preparados e com cobertura vegetal são menos favoráveis à deposição de sementes e fertilizantes em razão da menor mobilização

do solo (PORTELLA *et al.*, 1993). Esses solos apresentam diferentes propriedades se comparados àquelas do sistema convencional, como maior densidade, resistência ao cisalhamento e presença de cobertura vegetal, requerendo algumas alterações na configuração da máquina, o que, eventualmente, pode causar reações diferentes em seu comportamento durante a operação (BORTOLOTTI *et al.*, 2006).

Por fim, Landers (1995) destaca algumas características de semeadoras-adubadoras que atendem a essas condições. O autor destaca a presença de discos cortadores de vegetação residual, em frente aos mecanismos sulcadores de solo; maior robustez e massa; sistemas de regulação de profundidade mais precisos e independentes; presença de rodas duplas anguladas para compactação suave do solo; e estrutura reforçada para evitar deformações.

2.1.1 Discos de Corte de Palhada

Os discos cortadores, posicionados na barra porta ferramentas, são empregados na semeadura direta para o corte de resíduos culturais depositados na superfície do solo, facilitando a atuação dos mecanismos sulcadores. Os formatos mais comumente empregados são os discos do tipo liso, ondulado, estriado e corrugado (FAGANELLO *et al.*, 1992).

Quando devidamente afiados, os discos lisos proporcionam melhor qualidade de corte dos resíduos vegetais, além de demandarem menor carga e pressão das molas para penetração no solo (PORTELLA, 2001). Os discos estriados, por sua vez, aderem facilmente ao solo, reduzindo seu deslizamento ao passo que os ondulados, por apresentarem maior superfície de contato, requerem maior carga para penetração (SIQUEIRA; CASÃO JÚNIOR, 2004). Tanto os discos estriados quanto os ondulados aumentam a ação de preparo, auxiliando na fragmentação do solo no entorno da semente (DICKEY, 1992).

A adoção de discos cortadores contribui para melhorar desempenho da semeadura direta. Em condições adequadas, impedem a obstrução dos órgãos ativos do implemento, evitando problemas na deposição de sementes e adubos. A ausência desses discos leva à redução do rendimento operacional devido ao embuchamento,

o que requer paradas da máquina para remoção do material acumulado (SIQUEIRA; CASÃO JÚNIOR, 2004).

Além de eliminar o problema de obstrução da linha, os discos de corte de palha permitem reduzir os esforços demandados pela semeadora. Balbuena *et al.* (1998) verificaram que a utilização desses discos levou a uma redução de 15% na demanda de tração e de 12% na resistência ao cisalhamento. Em experimento semelhante, Terminiello *et al.* (1997) obtiveram redução de 32% no esforço de tração.

2.1.2 Mecanismos Sulcadores

Os mecanismos sulcadores tem por finalidade a abertura de sulcos para a deposição de sementes e adubos em profundidades adequadas para a germinação e desenvolvimento inicial de plantas (BALASTREIRE, 1987). A atuação desses mecanismos são afetados por sua geometria, pela quantidade de resíduos culturais na superfície do solo, pelas molas, pela profundidade de trabalho, velocidade de deslocamento do conjunto, além dos atributos físicos do solo como composição granulométrica, densidade e resistência (SIQUEIRA; CASÃO JÚNIOR, 2004).

Os tipos comumente empregados são o disco duplo e a haste sulcadora. O disco duplo é indicado para solos recém-desbravados ou destinados à semeadura direta, trabalhando associado ao disco cortador de palha. Esse disco, contudo, apresenta menor capacidade de corte se comparado com a haste, demandando maior força vertical para penetrar no solo, sobretudo quando sua textura é muito argilosa (FAGANELLO *et al.*, 2008; SIQUEIRA, 2008).

Nesse caso, a grande resistência do solo leva à deposição de adubo em profundidades muito próximas às das sementes, podendo resultar em menores índices de germinação (SIQUEIRA *et al.*, 2002). Em solos arenosos, a profundidade de trabalho do disco nem sempre é mantida em razão dos desmoronamentos prematuros das laterais do sulco (MACINTIRE *et al.*, 1986).

As hastes, também conhecidas como facão ou botinhas, possuem capacidade para operar em profundidades maiores, sendo comumente empregadas nos sistemas de deposição de adubo (COELHO, 1998). Mello *et al.* (2002), ao avaliarem o

desempenho de diferentes mecanismos sulcadores, verificaram que a haste apresentou maior capacidade de mobilização na linha de semeadura, reduzindo a densidade bem como a resistência do solo à penetração. Essas mudanças são desejáveis na semeadura direta, na qual a compactação superficial do solo é uma das restrições atribuídas ao sistema (SIQUEIRA *et al.*, 2002).

Essas ferramentas possuem formatos variados e diferentes ângulos de ataque que promovem diferentes níveis de mobilização, variando a pressão requerida para penetração no solo (GROTTA *et al.*, 2009). O ângulo de ataque (formado pelo ângulo entre o fundo do sulco e a soleira da haste) são dependentes da transferência de peso do implemento para o trator, sendo que o ângulo de 20° reduz a necessidade de peso adicional à semeadora, segundo avaliação feita por Casão Júnior *et al.* (2000).

Furlani *et al.* (2013), por sua vez, verificaram menor demanda de tração e de potência na barra com a utilização de hastes de formato parabólico. Siqueira *et al.* (2002) utilizaram hastes de mesmo formato com ângulo de ataque de cerca de 20° e espessura inferior a 0,022 m, constatando que essa configuração pode representar uma redução de até 50% na demanda de potência. Impende considerar ainda que, além da menor largura da ferramenta, menores profundidades de trabalho resultam em menor esforço de tração e, conseqüentemente, menor consumo de combustível (GAMERO, 2008; MAHL *et al.*, 2007).

2.2 DESEMPENHO OPERACIONAL

O adequado uso de máquinas e implementos agrícolas permite o produtor alcançar melhor desempenho operacional, tanto pelo aumento da capacidade efetiva de trabalho como melhor aproveitamento da energia (MODOLO, 2003). Isso inclui (a) maximizar a eficiência energética do motor e a eficiência mecânica das unidades de tração, (b) maximizar o aproveitamento do esforço de tração, e (c) selecionar velocidade ótima de trabalho para determinado conjunto mecanizado (GRISSE *et al.*, 2004).

A avaliação do rendimento de máquinas agrícolas a partir de parâmetros de demanda energética oferece informações importantes para o planejamento, evitando o sub ou superdimensionamentos durante a aquisição de maquinário. Isso permite

ainda auxiliar as indústrias no aperfeiçoamento bem como na adaptação de seus produtos às restrições edafoclimáticas das diferentes regiões do país (ARAÚJO *et al.*, 2001).

Importa considerar ainda o tipo e a estrutura do solo também devem ser considerados na avaliação do rendimento operacional das semeadoras (MAHL *et al.*, 2007). Além disso, o contato dos órgãos ativos dessas máquinas no solo é afetado também pelas variações de cobertura vegetal conforme a quantidade, tamanho e posicionamento da palha (CEPIK, 2006).

2.2.1 Capacidade e Eficiência de Trabalho

O gerenciamento dos sistemas mecanizados permite aumentar a qualidade operacional em diversas atividades na propriedade. Nisso, a análise operacional pode auxiliar nos processos decisórios concernentes aos aspectos técnicos, de tempo e de custos operacionais (BARATELLI *et al.*, 2011). A utilização eficiente do maquinário agrícola começa com a determinação da capacidade de trabalho em conjunção com a quantidade de trabalho a ser realizado dentro do tempo disponível para cada operação (HANCOCK *et al.*, 1991).

Em relação à capacidade de trabalho, Mialhe (1974) a distingue em capacidade de campo, de produção e de manipulação, conforme as características das operações envolvidas. A primeira se aplica a máquinas e implementos que se deslocam ao executarem uma operação agrícola. A capacidade de produção compreende a quantidade produzida, em massa ou volume, por unidade de tempo. Finalmente, a capacidade de manipulação está associada ao trabalho de separação de materiais como em beneficiadoras, por exemplo.

A capacidade de trabalho é dividida ainda em teórica e efetiva. O cálculo da capacidade de campo teórica (em ha.h^{-1}) considera a operação contínua de um equipamento agrícola, no tempo total do serviço. Na capacidade efetiva (CcE), também denominado rendimento de trabalho, o tempo total inclui perdas resultantes de manobras de cabeceira, ajustes em operação, entre outros. Logo, a eficiência da operação é a razão entre a capacidade de campo efetiva e a teórica (BALASTREIRE, 1987; PACHECO, 2000).

Witney (1988), por outro lado, propõe outras terminologias considerando os diferentes elementos de tempo envolvidos (Figura 1). A capacidade instantânea considera o tempo decorrido na operação para a qual a máquina foi projetada. A total inclui tempos necessários para que a máquina opere, como manobras nas extremidades do campo, além de paradas para desembuchar, reabastecer e descarregar, por exemplo.

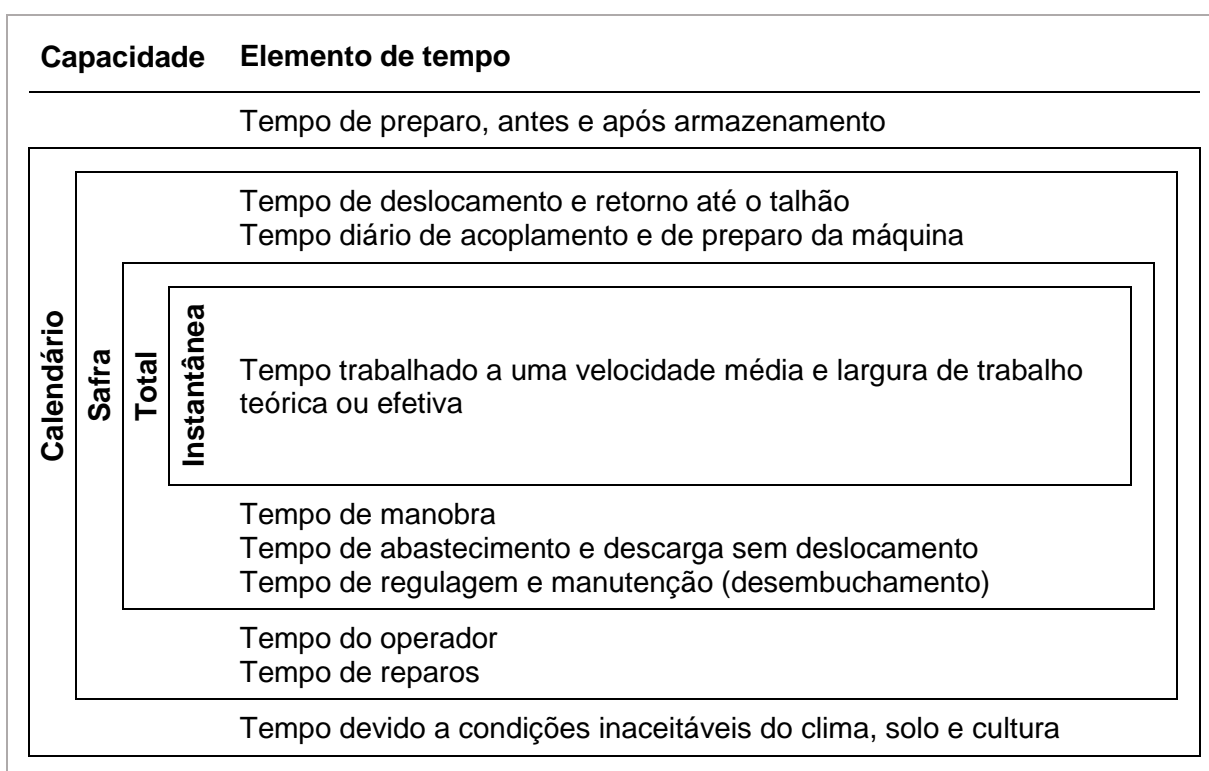


Figura 1 – Capacidades de trabalho associados aos elementos de tempo.
Fonte: Adaptado de Witney (1988).

O autor menciona ainda a capacidade safra, que envolve os tempos relacionados ao preparo do maquinário e ao gerenciamento do sistema. Por último, a de calendário refere-se aos tempos que não podem ser controlados, associados às condições edafoclimáticas e da cultura.

2.2.2 Velocidade

Toda operação com máquina agrícola deve considerar a velocidade do conjunto mecanizado. Essa variável influencia no consumo de combustível (FURLANI *et al.*,

2004), a capacidade de campo efetiva (BRANQUINHO *et al.*, 2004) e a qualidade de semeadura (MELLO *et al.*, 2007).

Lopes *et al.* (2003), ao avaliarem o desempenho de um trator, observaram que o aumento da velocidade de trabalho leva a uma diminuição no consumo específico de combustível. Mahl *et al.* (2004), por sua vez, obtiveram incremento de 86% na capacidade de campo efetiva e redução de 26% no consumo de combustível por hectare, quando a velocidade do conjunto trator-semeadora aumentou de 4,4 km.h⁻¹ para 8,1 km.h⁻¹.

Velocidades elevadas podem comprometer a produtividade da lavoura em decorrência dos possíveis danos causados às sementes nos dosadores mecânicos (BALASTREIRE, 1987). Segundo Nagaoka e Nomura (2003), a velocidade ideal de semeadura deve variar de 5 km.h⁻¹ a 7 km.h⁻¹. No entanto, a depender da tecnologia adotada, algumas semeadoras podem operar com maiores velocidades, aumentando a capacidade de trabalho.

2.2.3 Força de Tração

O esforço de tração resulta de forças oriundas da resistência oferecida pelo solo bem como de momentos atuantes no chassi da máquina e no implemento. No plano vertical longitudinal, essas forças podem ser decompostas em duas componentes: uma vertical e outra horizontal. A primeira, também conhecida como força de sucção ou de flutuação, leva o órgão ativo a penetrar no solo (GAMERO; LANÇAS, 1996).

A componente horizontal possui mesmo sentido de deslocamento do conjunto, sendo denominada força de tração (GAMERO; LANÇAS, 1996). Segundo a ASABE (2011) a força de tração requerida pelas semeadoras de precisão, deslocando-se em um bom leito de semeadura é de 900 N ± 25% por linha (apenas semeadura) e 1.820 N ± 25% por linha (semeadura, adubação e herbicida).

Segundo Gabriel Filho *et al.* (2004), a eficiência de tração é afetada pela presença de resíduos culturais, que levam a um aumento nos índices de patinação do trator. No experimento conduzido por Dickey *et al.* (1994), a influência desses

resíduos sobre o desempenho operacional do trator foi maior se comparada aos sistemas de manejo do solo investigados.

A interação pneu-solo influencia o esforço de tração por envolver reduções no avanço do trator bem como o recalque do rodado no solo (MIALHE, 1991; YANAI *et al.*, 1999). Bowers Junior (1985) verificou, para uma mesma semeadora, demandas de tração de 15 e 20% menores em solos arenosos não preparados em comparação com solos mobilizados, possivelmente devido à menor resistência ao rolamento encontrada nos solos firmes.

Casão Júnior *et al.* (1997), contudo, relataram a resistência à penetração de componentes rompedores em solos com elevados teores de argila, reduzindo o desempenho de semeadoras-adubadoras de plantio direto. De fato, Collins e Fowler (1996) verificaram uma demanda de tração cerca de 24% maior em solo muito argiloso se comparada ao solo de textura franco arenosa. Além disso, o aumento da profundidade de atuação dos mecanismos sulcadores levou a maiores incrementos na força de tração requerida pela semeadora.

No mesmo experimento, Collins e Fowler (1996) obtiveram ainda elevados coeficientes de variação para a força de tração. Segundo eles, tratam-se de fontes de erro na comparação do desempenho de diferentes implementos devidas aos diferentes atributos do solo.

2.2.4 Consumo de Combustível

O consumo de combustível normalmente é expresso em função do tempo ($L.h^{-1}$), sendo denominado consumo horário. Essa relação, contudo, não considera os efeitos da variação da temperatura e da potência gerada. No entanto, o consumo específico, expresso em termos de massa por unidade de potência ($g.kW.h^{-1}$), considera esses efeitos, sendo utilizada na comparação de motores e tratores (LOPES *et al.*, 2003)

O consumo de combustível de tratores agrícolas é afetado pelo tipo de pneu, demanda de força na barra de tração e pela velocidade do conjunto mecanizado (LOPES; FURLANI, 2003). No sistema de manejo convencional, o maior número de

operações realizadas no solo resulta em um maior consumo volumétrico (FERNANDES *et al.*, 2008). No plantio direto, por outro lado, o consumo horário é maior devido à maior demanda de força exigida pelo sistema (FURLANI *et al.*, 2008).

Em relação ao tipo de pneu, Potier (1990), Corrêa *et al.* (1997) apontaram para a vantagem no uso do pneu radial. Lopes *et al.* (2003) também observaram menores consumos específicos nas diferentes condições de lastragem estudada. O aumento no consumo de combustível está associado também à maior força exigida na barra de tração devido à maior resistência aplicada ao trator (GROTTA *et al.*, 2009).

2.3 MODELAGEM

Um modelo matemático pode ser compreendido como uma “representação simplificada da realidade” (CHRISTOFOLETTI, 1999). Trata-se de uma representação matemática dos mecanismos que governam um fenômeno natural, oferecendo meios de expressar o conhecimento científico (TEDESCHI, 2006).

A elaboração de um esquema representativo é altamente subjetiva por não incluir todas as observações e medidas associadas ao fenômeno ao passo que a omissão de detalhes acidentais permite o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade (CHORLEY; HAGGETT, 1967). O modelo é, assim, idealizado por não haver qualquer garantia utópica de que resposta se comprovará ser a melhor para o problema real, haja vista a existência de muitos fatores imponderáveis e incertezas associadas aos problemas práticos (HILLIER; LIEBERMAN, 2012).

Contudo, um modelo bem formulado e testado pode oferecer respostas satisfatórias para grande variedade de problemas reais. Segundo Barioni *et al.* (2002), a modelagem pode auxiliar na tomada de decisão por meio de predições de interesse particular. Os autores apontam ainda para a possibilidade de melhor compreender as interações pertinentes ao comportamento do modelo, partindo da identificação de atributos que melhor representam essas interações.

A literatura apresenta uma variedade de topologias de modelos, alguns dos quais exploram relações que não foram previamente considerados. Chorley (1964) e Woldenberg (1985) apresentaram uma topologia bastante ampla com três grupos

principais: modelos análogos naturais, modelos que sintetizam sistemas, modelos análogos abstratos. Este último é formado, entre outros, de modelos matemáticos na forma de expressões constituídas de variáveis, parâmetros e constantes matemáticas.

Essas expressões são definidas a partir das hipóteses qualitativas referentes ao sistema estudado. Na formulação matemática, a definição dos parâmetros e das variáveis permitem caracterizar tal sistema e descrever quantitativamente o fenômeno estudado, respectivamente (TUCCI, 2005). As equações propostas podem ser comumente resolvidas com o uso de técnicas numéricas, sendo a adequação das respostas feitas mediante o ajuste dos parâmetros e das condições de contorno (CHRISTOFOLETTI, 1999; TRUCANO *et al.*, 2006). O ajuste dos parâmetros baseia-se na correlação e regressão envolvendo comparação entre o modelo empírico e os valores obtidos experimentalmente.

2.3.1 Meta-Análise

A meta-análise é uma revisão sistemática apoiada em métodos estatísticos que envolve a descrição de resultados de diversos estudos empíricos com a finalidade de obter estimativas meta-analíticas que sumarizem esses dados (HEDGES; VEVEA, 1998). Sua aplicação conota uma alternativa rigorosa a narrativa de trabalhos de científicos, explicada não só pela minimização de vieses como também pelo aumento do poder estatístico da pesquisa primária (GLASS, 1976; SACKS *et al.*, 1996).

A metodologia faz uso de fatores comuns aos estudos para explicar a variância dos resultados bem como estimativas do tamanho dos efeitos (ROSCOE; JENKINS, 2005). Essas estimativas se traduzem em medidas expressas em uma escala comum como razão de possibilidades (ou *odd ratio*), risco relativo ou ainda diferença de risco os quais são aplicados na integração dos resultados (FLEISS; BERLIN, 2009).

Segundo Deeks (2002), impende ao pesquisador considerar nessas medidas a consistência do efeito, a facilidade de interpretação e as propriedades matemáticas. Para inferir sobre o tamanho médio do efeito, podem utilizar-se os modelos de efeitos fixos, de efeitos aleatórios ou mistos.

2.3.1.1 Modelos Lineares de Efeito Fixo

Segundo Hedges e Vevea (1998), os modelos lineares de efeito fixo pressupõem a homogeneidade dos estudos, sendo a variabilidade entre eles atribuída apenas ao erro aleatório. Esse modelo é denotado pela Equação 1:

$$Y_i = \theta + \varepsilon_i \quad (1)$$

em que:

Y_i = efeito observado no estudo i ;

θ = tamanho do efeito; e

ε_i = erro aleatório, assumindo $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$.

2.3.1.2 Modelos Lineares de Efeito Aleatório

Nos modelos lineares de efeito aleatório, considera-se que a diferença entre os estudos é devida não apenas ao erro aleatório mas também à heterogeneidade entre eles (HEDGES; VEVEA, 1998). Esse modelo é dado pela Equação 2:

$$Y_i = \theta + \mu_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

em que:

Y_i = efeito observado no estudo i ;

θ = tamanho do efeito;

μ_i = efeito aleatório do estudo i , assumindo $\mu_i \sim \mathcal{N}(0, \tau_i^2)$; e

ε_i = erro aleatório, assumindo $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_i^2)$.

2.3.1.3 Modelos Lineares de Efeito Misto

Os modelos lineares de efeito misto incorporam efeitos fixos e aleatórios. Esses modelos também são designados por modelos de multinível pois os efeitos aleatórios representam níveis de variação além do desvio de cada observação que normalmente é incorporado aos modelos de regressão (BATES; DEBROY, 2004).

Segundo Bates *et al.* (2015), esses modelos são descritos por uma distribuição condicional de Y dado $B = b$, sendo Y o vetor de variáveis dependentes e B , de efeitos aleatórios. Os modelos de multinível são designados pela Equação 3:

$$(Y|B = b) \sim \mathcal{N}(X\beta + Zb + o, \sigma^2 W^{-1}) \quad (3)$$

em que:

X = matriz $n \times p$ de regressores cujos efeitos são considerados fixos;

β = vetor $p \times 1$ dos coeficientes dos efeitos fixos; e

Z = matriz $n \times q$ de regressores cujos efeitos são considerados aleatórios.

Denotada por $B \sim \mathcal{N}(0|\Sigma)$, a distribuição incondicional do vetor B é também uma distribuição normal multivariada de média zero e uma matriz Σ positiva semidefinida de variâncias-covariância dos erros aleatórios.

A estimação dos parâmetros é baseada no método da máxima verossimilhança (ML) e no método da máxima verossimilhança restrita (REML) (LONGFORD, 1993). Antes de introduzir o método ML, aplicado neste trabalho, considere o modelo de efeito misto originalmente introduzido por Laird e Ware (1982) na forma da Equação 4:

$$Y_i = X_i\beta + Z_i b_i + \varepsilon_i \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

em que os vetores apresentados possuem a mesma notação da Equação 3 para cada grupo i . Para tanto, importa considerar ainda algumas suposições distributivas tais como $\varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 I_{n_i})$, $b_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2 D)$ e $Y_i \sim \mathcal{N}(X_i\beta, \sigma^2 W_i)$, onde D é uma matriz definida não negativa de ordem q e $W_i = I_{n_i} + Z_i D Z_i^T$ (SEARLE *et al.*, 1992).

A inferência no modelo marginal de distribuição $Y_i = \mathcal{N}(X_i\beta, W_i)$ é baseada na maximização da função verossimilhança marginal denotada pela Equação 5, a partir da qual é obtido o vetor θ de todos os parâmetros do referido modelo, a saber: os vetores β e $\sigma^2 I$, além do vetor α com as componentes da variância na matriz D .

$$\mathcal{L}_{ML}(\theta) = \prod_{i=1}^M \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{\frac{n_i}{2}}} |W_i(\alpha)| \exp\left(\frac{-(Y_i - X_i\beta)^T W_i^{-1}(\alpha)(Y_i - X_i\beta)}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

A função acima poder ser alternativamente aplicada por meio do seu respectivo logaritmo (Equação 6):

$$\log \mathcal{L}_{ML}(\theta) = -\frac{N}{2} \log(2\pi\sigma^2) + \sum_{i=1}^M \log W_i(\alpha) - \sum_{i=1}^M \frac{(Y_i - X_i\beta)^T W_i^{-1}(\alpha)(Y_i - X_i\beta)}{\sigma^2} \quad (6)$$

O método da máxima verossimilhança (ML) consiste em maximizar a Equação 6 em relação a α e β , obtendo os estimadores $\hat{\alpha}_{ML}$ e $\hat{\beta}_{ML}$. O mesmo resultado é obtido maximizando a Equação 6 em relação a α , após a substituição de β pela Equação 7 (SUN, *et al.*, 2007):

$$\hat{\beta}(\alpha) = (X^T W^{-1} X)^{-1} (X^T W^{-1} Y) \quad (7)$$

em que $W_i = I_{n_i} + Z_i D Z_i^T$, com $i = 1, \dots, m$, e $Y = (Y_1^T, \dots, Y_m^T)^T$.

Os regressores de efeitos aleatórios, por sua vez, podem ser obtidos com base nas equações do modelo de efeito misto (SEARLE *et al.*, 1992) ou na estimação Bayesiana empírica (VERBEKE; MOLENBERGHS, 2000). Neste último, o valor predito de b_i , denotado por \hat{b}_i , é o valor esperado da distribuição *a posteriori*.

Lindstrom e Bates (1988) definiram esse valor para uma distribuição condicional de b dado Y , através da Equação 8:

$$\hat{b}_i(\theta) = E(b_i | Y_i) = \int b_i f(b_i | Y_i) db_i = D Z_i^T (W_i(\alpha))^{-1} (Y_i - X_i \beta) \quad (8)$$

em que, os efeitos fixos β e os componentes da variância D são substituídos por suas estimativas, no MLE ou RMLE. Por utilizar essas estimativas, \hat{b}_i também é designado por estimador Bayes empírico.

2.3.2 Avaliadores e Teorias da Informação

A modelagem requer uma análise estatística apropriada para se detectar a adequação do modelo, bem como o uso de observações não enviesadas durante as etapas de desenvolvimento e avaliação (TEDESCHI, 2006). Diversas abordagens envolvendo a análise estatística são utilizadas para avaliar a qualidade do modelo, podendo oferecer diferentes perspectivas acerca do erro de previsão.

A utilização de avaliadores é crucial para escolha entre modelos alternativos. Essa escolha comumente é baseada no princípio da parcimônia, envolvendo o *trade-*

off entre o viés e a variância: o aumento no número de parâmetros resulta em um melhor ajuste do modelo ao passo que se aumenta a incerteza associada à estimativa desses parâmetros por haver uma menor quantidade de informação por parâmetro (Figura 2) (BURNHAM; ANDERSON, 2002).

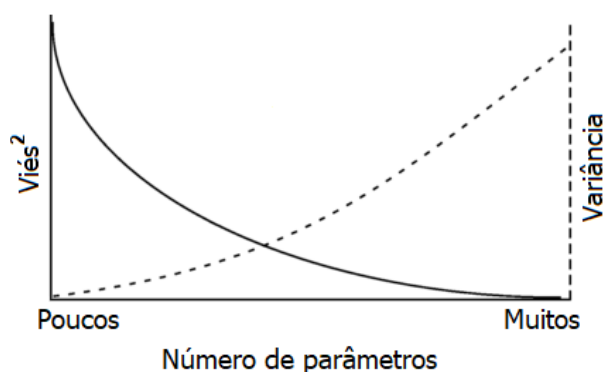


Figura 2 – Princípio da parcimônia.

Fonte: Adaptado de Burnham e Anderson (2002).

Existem dois meios para se obter um modelo com base nesse princípio: o uso de significância estatística e o uso de critérios de informação. A primeira consiste em eliminar os termos do modelo que são estatisticamente menos significantes até que todos os termos restantes atinjam significância estatística.

Os critérios de informação oferecem uma estimativa da perda relativa de informação quando determinado modelo é utilizado para representar sistema que gerou os dados (BURNHAM; ANDERSON, 2002). Os mais comumente utilizados são o Critério de Informação de Akaike (AIC) (AKAIKE, 1973), Critério de Informação de Akaike Corrigido (AICc) (HURVICH; TSAI, 1989) e o Critério de Informação Bayesiano (BIC) (SCHWARZ, 1978).

Esses critérios são particularmente úteis quando o emprego o método iterativo *stepwise* pode levar a uma seleção arbitrária de variáveis. Por exemplo, nos casos em que ocorre forte colinearidade entre alguns termos do modelo, a estimativa de seus parâmetros pode ser bastante instável e inflada, de modo que a presença de certas variáveis pode afetar a significância de outras (HARRELL, 2001).

Importa considerar, contudo, duas limitações associadas ao uso desses critérios. Enquanto o critério de informação fornece uma estimativa do relativo ajuste de

modelos alternativos, não oferece uma medida absoluta da qualidade do ajuste (BURNHAM; ANDERSON, 2002). Além disso, Orelie e Edwards (2008) aduzem que esses critérios não oferecem qualquer informação acerca da variação explicada pelo modelo.

2.3.2.1 Erro Padrão da Estimativa

O erro padrão da estimativa (MSE) é um estimador não viesado da variância do erro aleatório que é calculado pela Equação 9 (KOBAYASHI; SALAM, 2000):

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(\hat{Y}_i - Y_i)^2}{n} \quad (9)$$

em que:

MSE = erro padrão da estimativa;

Y_i = valor observado;

\hat{Y}_i = valor estimado; e

n = número de observações.

De acordo com a equação, quanto menor o valor do erro padrão, mais próximo estão os valores estimados dos observados. A principal vantagem desse avaliador está na possibilidade de decompô-lo em componentes individuais, o que ajuda a compreender a origem dos erros na modelagem.

Segundo Kobayashi e Salam (2000), o erro padrão da estimativa pode ser particionado inicialmente em dois componentes. O primeiro é quadrado do viés do modelo, denotado por $SB = (\bar{Y} - E(\hat{Y}))^2$, no qual $E(\hat{Y})$ é o valor esperado de \hat{Y} e \bar{Y} é a média de Y_i , com $i = 1, 2, \dots, n$. O viés mede a diferença média entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo.

O segundo componente é a variação quadrática média (MSV) definida pela diferença entre os valores observados e os valores estimados com relação ao desvio das médias, ou seja, $MSV = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(\hat{Y}_i - E(\hat{Y})) - (Y_i - \bar{Y})]^2$. Percebe-se que maior valor MSV indica que o modelo falhou em simular a variabilidade em torno da média.

No caso de estimadores não viesados ($SB = 0$), o MSE e a variância do erro são equivalentes. Em um modelo incorreto, no entanto, os resíduos possuem além do componente aleatório, um componente sistemático associado ao viés. Nesse caso, MSE tende a ser inflado, não oferecendo uma medida satisfatória da variação aleatória das observações (DRAPER; SMITH, 1998).

Kobayashi e Salam (2000) ainda decomuseram o MSV como $MSV = SDSD + LCS$. Esses componentes são denotados pelas Equações 10 e 11.

$$SDSD = \frac{(\sigma_Y - \sigma_{\hat{Y}})^2(n-1)}{n} \quad (10)$$

$$LCS = \frac{2\sigma_Y\sigma_{\hat{Y}}(1-r)(n-1)}{n} \quad (11)$$

em que:

$$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{Y})^2]} \text{ (estimativa do desvio-padrão de } Y\text{);}$$

$$\hat{\sigma}_{\hat{Y}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(Y_i - E(\hat{Y}))^2]} \text{ (estimativa do desvio-padrão de } \hat{Y}\text{);}$$

$$r = \hat{\sigma}_{Y\hat{Y}} / \sigma_Y \sigma_{\hat{Y}} \text{ (correlação entre } Y \text{ e } \hat{Y}\text{); e}$$

$$\hat{\sigma}_{Y\hat{Y}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{Y})(Y_i - E(\hat{Y}))] \text{ (estimativa da covariância de } Y \text{ e } \hat{Y}\text{).}$$

O termo $SDSD$ está relacionado com a diferença entre o desvio-padrão das observações e o desvio-padrão dos valores previstos pelo modelo. Um valor elevado indica que o modelo falhou em simular a magnitude de flutuação entre as n observações. O termo LCS mede a ausência de correlação positiva ponderada pelos desvios padrões; maior valor indica que o modelo falhou em simular o padrão de variação observada de Y (KOBAYASHI; SALAM, 2000).

Gauch Junior, Hwang e Fick (2003), por outro lado, sugerem decompor MSE em termos explicitamente relacionados à equação de regressão $\hat{Y} = f(Y)$, conforme Equação 12:

$$MSE = SB + NU + LC \quad (12)$$

em que:

SB = quadrado do viés;

$$NU = (1 - b_{Y\hat{Y}})^2 \sigma_Y^2 (n - 1) / n;$$

$$LC = (1 - r^2) \sigma_Y^2 (n - 1) / n \text{ (ausência de correlação);}$$

$$b_{Y\hat{Y}} = \sigma_{Y\hat{Y}}^2 / \sigma_{\hat{Y}}^2 \text{ (inclinação na linha } \hat{Y} = f(Y)\text{); e}$$

$$\hat{\sigma}_{Y\hat{Y}} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [(Y_i - \bar{Y})(Y_i - E(\hat{Y}))] \text{ (estimativa da covariância de } Y \text{ e } \hat{Y}\text{).}$$

A Equação 12 é parecida com a Equação 11, sendo SB e LC dependentes de como a variação em Y e \hat{Y} estão correlacionados. O termo NU, por sua vez, mede a quão próxima inclinação da reta $\hat{Y} = f(Y)$ está da unidade.

2.3.2.2 Erro Quadrático Médio de Previsão

O MSEP (*mean squared error of prediction*) é um critério de qualidade preditiva que consiste na diferença entre os valores observados (Y) e os valores preditos por determinado modelo $f(X, \hat{p})$, conforme a Equação 13 (WALLACH *et al.*, 2014).

$$MSEP = E \left[(Y - f(X, \hat{p}))^2 \right] \quad (13)$$

em que:

Y = valor observado;

$f(X, \hat{p})$ = predição dada pelo modelo, o qual consiste em variáveis explicativas X e parâmetros \hat{p} ; e

$E[\cdot]$ = expectância.

Na equação, como expectância está associada a uma população de interesse, não se pode, em geral, mensurar o MSEP diretamente. Wallach *et al.* (2014) explicam que o MSE pode ser um estimador realístico do MSEP, desde que a amostra seja representativa e que não seja utilizada no desenvolvimento do modelo.

Nos casos em que os parâmetros do modelo são ajustados a partir do conjunto de dados, a Equação 13 pode subestimar o MSEP (WALLACH; GOFFINET, 1989). Sendo o modelo especificadamente ajustado aos dados, ele tende a reproduzi-los mais precisamente em detrimento do valor esperado para uma população. Diante disso, diferentes abordagens podem ser seguidas para se estimar o MSEP, como a técnica de validação cruzada (PICARD; COOK, 1984) e técnica *bootstrap* (EFRON, 1979, 1983).

Mitchell e Sheehy (1997), por outro lado, apontam algumas falhas do MSEP. Como a diferença está elevada à segunda potência, o sinal negativo é eliminado e os desvios são ponderados de modo que as observações de maior valor exercem maior influência no cálculo do avaliador. Destarte, segundo os autores, o MSEP não oferece informação acerca da precisão do modelo.

Uma abordagem mais simples e informativa do referido avaliador foi apresentada por Wallach e Goffinet (1989). Para os autores, problema de comparação de modelos pode ser tratada estimando a diferença entre valores de MSEP de dois modelos. Essa diferença é dada pela Equação 14:

$$\begin{aligned} \Delta MSEP &= E \left[(Y - f(X, \hat{p}))^2 - (Y - g(X', \hat{p}'))^2 \right] \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n \left[(Y - f(X, \hat{p}))^2 - (Y - g(X', \hat{p}'))^2 \right]}{n} \end{aligned} \quad (14)$$

em que:

$\Delta MSEP$ = diferença entre os valores de MSEP;

Y = valor observado;

X = variáveis explicativas do modelo $f(\cdot)$;

\hat{p} = parâmetros do modelo $f(\cdot)$;

X' = variáveis explicativas do modelo $g(\cdot)$;

\hat{p}' = parâmetros do modelo $g(\cdot)$; e

n = número de observações.

2.3.2.3 Coeficiente de Determinação Ajustado

O coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) é uma estimativa não enviesada da contribuição de um conjunto de variáveis explanatórias X para explicar Y (OHTANI, 2000). Essa medida é definida pela Equação 15:

$$R_{aj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n - 1}{n - p - 1} \right) \quad (15)$$

em que:

R_{aj}^2 = coeficiente de determinação, denotado por $R^2 = \sum(\hat{Y}_i - \bar{Y})^2 / \sum(Y_i - \bar{Y})^2$;

n = número de observações; e

p = número de variáveis explanatórias do modelo.

Essa equação, em geral, é empregada no lugar do coeficiente de determinação R^2 , o qual é uma estimativa enviesada. Seu viés é notadamente grande quando o número de observações é pequeno (MONTGOMERY; MORRISON, 1973). Destarte, o ajuste associado à estatística R_{aj}^2 tem por finalidade corrigir esse viés.

O ajuste considera os respectivos graus de liberdade associados ao numerador e ao denominador do coeficiente de determinação R^2 (DRAPER; SMITH, 1998). Assim, em uma regressão ordinária múltipla, os graus de liberdade total da estatística F é dado por $(n - 1)$ e os graus de liberdade dos resíduos, $(n - p - 1)$.

2.3.2.4 Critério de Informação de Akaike

O Critério de Informação de Akaike (*Akaike's information criterion* – AIC), definido pela Equação 16 e proposto por Akaike (1974), mede a qualidade de ajuste do modelo paramétrico, estimado pelo método da máxima verossimilhança.

$$AIC(\hat{\theta}) = -2 \log[\mathcal{L}(\hat{\theta})] + 2k \quad (16)$$

em que:

$\mathcal{L}(\hat{\theta})$ = função de máxima verossimilhança; e

k = número de parâmetros ajustados independentemente para se obter $\hat{\theta}$.

O termo somado à função log-verossimilhança é uma função de penalidade, que tem como finalidade corrigir um viés oriundo da comparação de modelos com vetor parâmetro de dimensões diferentes. Burnham & Anderson (2002), recomendam a utilização do AIC quando $n/k \geq 40$, no qual n é o tamanho da amostra.

O AIC baseia-se na esperança relativa entre a distância de Kullback-Leibler e a função suporte maximizada. Essa distância é a medida de ineficiência em assumir que a distribuição é g quando a verdadeira distribuição é f (COVER; THOMAS, 1991).

Segundo Casella e Berger (2016), o estimador de máxima verossimilhança de θ , denotado por $\hat{\theta}$, é o valor que maximiza a função de máxima verossimilhança $\mathcal{L}(\theta|X)$, denotada pela Equação 17:

$$\mathcal{L}(\theta|X) = \prod_{i=1}^N g(X = x_i|\theta) \quad (17)$$

em que $g(X|\theta)$ é a função densidade de probabilidade da amostra $X = (x_1, \dots, x_N)$ e θ pertence ao espaço paramétrico Θ . Esse estimador é calculado tomando as derivadas parciais e igualando a zero, ou seja, $\frac{\partial \mathcal{L}(\theta|X)}{\partial \theta} = 0$.

Isso equivale também encontrar o valor máximo da função suporte $\log[\mathcal{L}(\theta|X)]$. A transformação logarítmica aplicada à função verossimilhança permite trabalhar com valores em uma escala maior, além de auxiliar a tratabilidade matemática desta função (CRAMÉR, 1973).

Considerando um modelo associado a uma família paramétrica de uma função densidade $f(x_i|\theta)$, o valor esperado da função suporte é dada por $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log[f(x_i|\theta)]$.

Quando $N \rightarrow \infty$, o valor esperado tende, com probabilidade igual a 1, a assumir a forma da Equação 18:

$$E_G(g; f(\cdot|\theta)) = \int g(x) \log[f(\cdot|\theta)] dx, \quad (18)$$

desde que a integral exista.

Como o estimador de máxima verossimilhança é assintoticamente eficiente nas condições de consistência, entende-se que $E_G(g; f(\cdot|\theta))$ deva ser um critério sensível para medir pequenos desvios entre $f(x_i|\theta)$ e $g(x)$ (AKAIKE, 1974). Assim, de acordo com Bozdogan (1987), sendo necessária a seleção do vetor θ que mais se aproxima dos parâmetros verdadeiros de $g(x)$, a medida relativa de adequação entre ambas as funções é dada pela entropia generalizada de Boltzmann (1877), que corresponde ao oposto da quantidade de informação de Kullback-Leibler (Equação 19):

$$-B(g; f(\cdot|\theta)) = I(g; f(\cdot|\theta)) = \int g(x) \log\left(\frac{g(x)}{f(x|\theta)}\right) dx. \quad (19)$$

Ao considerar $g(x) = f(x|\theta_0)$, denotando $I(g; f(\cdot|\theta))$ e $E_G(g; f(\cdot|\theta))$ nessa ordem por $I(\theta_0; \theta)$ e $E_G(\theta_0; \theta)$, a expansão de $I(\theta_0; \theta)$ em séries de Taylor com relação a seu segundo argumento em torno de θ_0 resulta na Equação 20:

$$I(\theta_0; \theta_0 + \Delta\theta) \cong \frac{1}{2} \|\Delta\theta\|_J^2 \quad (20)$$

em que:

$$\|\Delta\theta\|_J^2 = (\theta - \theta_0)' J (\theta - \theta_0); \text{ e}$$

$$J = \text{matriz de informação de Fisher, } J = E \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \log f(X|\theta) \right]' \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \log f(X|\theta) \right] \Big|_{\theta=\theta_0} \right\}.$$

Considerando a situação na qual a variação de θ está restrito ao espaço paramétrico Θ_k , e o verdadeiro vetor paramétrico θ_0 , ao espaço Θ_K , com $k < K$, obtém-se a aproximação dada pela Equação 21.

$$2I(\theta_0; \theta_k) \cong 2I(\theta_0; \hat{\theta}_k) \quad (21)$$

na qual o estimador de máxima verossimilhança $\hat{\theta}_k$ em Θ_k é suficientemente próximo da projeção euclidiana de θ_0 sobre o mesmo espaço Θ_k , denotado por θ_{0k} .

Assim, aplicando o teorema pitagoreano tem-se a Equação 22:

$$2I(\theta_0; \hat{\theta}_k) \cong \|\theta_0 - \theta_{0k}\|_J^2 + \|\theta_{0k} - \hat{\theta}_k\|_J^2. \quad (22)$$

Para N suficientemente grande, a média da distribuição aproximada é dada pelo valor esperado da quantidade de informação de Kullback-Leibler (Equação 23).

$$\begin{aligned} 2NE[I(\theta_0; \hat{\theta}_k)] &\cong E \left[N\|\theta_0 - \theta_{0k}\|_J^2 + N\|\theta_{0k} - \hat{\theta}_k\|_J^2 \right] \\ &= N\|\theta_0 - \theta_{0k}\|_J^2 + E \left[N\|\theta_{0k} - \hat{\theta}_k\|_J^2 \right]. \end{aligned} \quad (23)$$

Na equação acima, o termo $N\|\theta_{0k} - \hat{\theta}_k\|_J^2$ possui uma distribuição chi-quadrado com k graus de liberdade. Assim, sendo $E(\chi) \sim k$, a equação acima pode ser expressa pela Equação 24:

$$2NE[I(\theta_0; \hat{\theta}_k)] \cong N\|\theta_0 - \theta_{0k}\|_J^2 + k \quad (24)$$

O primeiro termo é desconhecido; porém, determinístico. Para estimar o referido termo, Akaike (1973) utilizou a expressão $-2 \sum_{i=1}^N \log \frac{f(x_i|\hat{\theta}_k)}{f(x_i|\hat{\theta}_K)}$.

É necessária, contudo, uma correção do viés associado à substituição de θ_{0_k} por $\hat{\theta}_k$. Isso pode ser feito, segundo Akaike (1974), adicionando k à equação acima. Na comparação de estimativas de $E[I(\theta_0; \hat{\theta}_k)]$ para diferentes modelos, o termo que inclui $\hat{\theta}_K$ pode ser omitido, reduzindo a expressão para uma forma mais simples do *AIC*.

Por fim, Forster e Sober (1994) destacam algumas suposições concernentes ao *AIC*, a saber:

- a. O conjunto de observações são obtidos de um mesmo processo subjacente;
- b. O tamanho da amostra é suficientemente grande para garantir que a função verossimilhança se aproximará de suas propriedades assintóticas;
- c. A verdadeira distribuição das estimativas dos parâmetros, quando o número de observações é suficientemente grande, segue uma distribuição normal multivariada.

2.3.2.5 Critério de Informação de Akaike Corrigido

O *AIC* é um avaliador assintótico e pode ser inapropriado quando o tamanho da amostra n é pequeno ou quando o número de parâmetros k estimados para o modelo é grande. Nesses casos, o *AIC* pode falhar ao selecionar um modelo adequadamente parcimonioso por se tornar um estimador de informação negativamente viesado, o que pode ser explicado pela menor acurácia em algumas expansões em séries de Taylor para a informação utilizada na derivação do *AIC*, quando a relação k/n aumenta (BURNHAM; ANDERSON, 2002; SUGIURA, 1978).

Uma forma equivalente é representada na Equação 25, proposta por Hurvic & Tsai (1989), na qual AIC_c é a soma do avaliador *AIC* mais o termo de penalidade não estocástico:

$$AIC_c = AIC + \frac{2(k+1)(k+2)}{n-k-2} \quad (25)$$

em que:

k = número de parâmetros do modelo; e

n = tamanho da amostra.

2.3.2.6 Critério de Informação Bayesiano

O Critério de Informação Bayesiano (*Bayesian Information Criterion* – BIC), proposto por (SCHWARZ, 1978), é denotado pela Equação 26,

$$BIC(\hat{\theta}) = -2 \log[\mathcal{L}(\hat{\theta})] + k \log n \quad (26)$$

em que:

$\mathcal{L}(\hat{\theta})$ = função de máxima verossimilhança;

k = número de parâmetros do modelo; e

n = número de observações.

Segundo Forster e Sober (2004), quando $n > 8$, o BIC seleciona o modelo mais simples se comparado ao AIC. Por outro lado, Burnham e Anderson (2002) sugerem que o BIC pode ser utilizado genericamente.

2.4 MODELO DA ASABE

A *American Society of Agricultural and Biological Engineers* (ASABE), por meio da norma técnica ASAE D497.7 MAR2011 (ASABE, 2011), apresenta uma equação inicialmente proposta por Harrigan e Rotz (1995) para modelar a força de tração requerida sob condições gerais do solo e configurações básicas de operação. Trata-se de função quadrática crescente e variável em função da velocidade do conjunto mecanizado, conforme Equação 27:

$$D = F_i \cdot [A + B(S) + C(S)^2] \cdot W \cdot T \quad (27)$$

em que:

D = força de tração requerida pelo implemento (N);

F_i = coeficiente de ajuste (adimensional);

$i = 1$ para textura fina, 2 para média e 3 para textura grossa;

A, B e C = coeficientes específicos da máquina;

S = velocidade de deslocamento (km h^{-1});

W = largura da máquina (m) ou número de elementos ativos; e

T = profundidade de trabalho (cm) para ferramentas maiores, podendo ser igual a 1 (adimensional) para ferramentas menores e sulcadores de semeadora.

Essa equação é utilizada para modelar a força de tração requerida por implementos nas operações de preparo e semeadura de solo. Os parâmetros específicos da máquina variam em função do tipo de ferramenta, sendo o parâmetro A uma constante e os parâmetros B e C, coeficientes de velocidade (HARRIGAN; ROTZ, 1995).

O modelo assume ainda que a resistência do solo diminui e sua densidade diminui quando a textura do solo passa de fina para grossa. Solos de textura fina são descritos como muito argilosos enquanto que os de textura grossa são arenosos. Os solos de textura média apresentam uma menor predominância da fração de argila (HARRIGAN; ROTZ, 1995).

Os parâmetros relacionados à máquina e à granulometria do solo representam a mediana de um conjunto de dados oriundos de pesquisas publicadas. Esses valores, segundo Harrigan e Rotz (1995), são os mais representativos das condições típicas de operação nos três grupos principais de classes textuais. Os parâmetros relacionados às semeadoras-adubadoras para plantio direto são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 – Parâmetros relacionados à máquina e ao solo.

Implemento	Parâmetros de máquina			Parâmetros de solo			Variação (%)
	A	B	C	F ₁	F ₂	F ₃	
Semeadora-adubadora	1820,0	0,0	0,0	1,00	0,96	0,92	± 25,0

Fonte: Transcrito de ASAE D497.7MAR2011.

A inclusão de somente condições operacionais típicas permite atribuir grande variabilidade ao se estimar a demanda de tração a partir do modelo. O modelo não considera condições específicas de máquina tampouco de solo como regulagens do

implemento, teor de água no solo e presença de resíduos culturais na superfície. Assim, a força de tração média ou típica deve estar incluída em um intervalo de variação.

O intervalo representa a variação esperada da força de tração típica enquanto as condições não incluídas no modelo variam. No entanto, as grandes flutuações de tração que ocorrem quando o conjunto mecanizado se desloca no campo não afetam esse intervalo.

Os modelos da ASABE, embora possam ser facilmente compreendidos, têm como inconveniente apresentar em suas tabelas valores de parâmetros oriundos de pesquisas realizadas em solos estadunidenses. Santos (2010) argumenta que a utilização desses parâmetros pode não garantir a mesma precisão ao prever valores de tração em solo tipicamente brasileiros.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

O trabalho iniciou com a sistematização de um conjunto de dados obtidos por meio da revisão da literatura que incluiu artigos de periódicos indexados, dissertações, teses e relatórios técnicos de órgãos de pesquisa nacionais. Essa etapa incluiu a definição operacional das variáveis, observando os procedimentos utilizados para medir cada variável, bem como o delineamento experimental adotado.

Os trabalhos pesquisados basicamente avaliavam a demanda energética de semeadoras de fluxo contínuo e de precisão ou a qualidade agrônômica da operação de semeadura. Os primeiros mediam principalmente o esforço de tração requerido na barra de tração de um conjunto de arrasto, ou ainda a força de tração medida nos mecanismos sulcadores em cada linha de uma semeadora montada.

Nesses trabalhos, os valores para força média e força máxima eram obtidas com o auxílio de células de carga ou extensômetros elétricos de resistência. A partir desses dados se calculavam grandezas derivadas como potência média, potência máxima, além de potência e força de tração específicas. A demanda energética era comumente avaliada também em termos de consumo de combustível, mensurado por meio de medidores de fluxo ou pelo método gravimétrico (proveta). A variável era expressa pelo consumo horário e operacional.

Enquanto se interagia com a literatura, foram se aprimorando os critérios para extração dos dados, bem como sua organização no que concerne à caracterização da área experimental, sistema de manejo adotado, tipo e dimensões dos órgãos de ataque da semeadora e suas regulagens. A presença nos resultados das grandezas de interesse e a descrição pormenorizada da metodologia e da área experimental se tornaram inicialmente os principais critérios elegibilidade dos trabalhos.

Em alguns casos, foi necessária a discretização de dados para que estas fossem incluídas em sua base. Assim, para resultados apresentados na forma modelos de regressão com elevado coeficiente de determinação, foram considerados os fatores quantitativos indicados nas publicações como variáveis explicativas dos respectivos

modelos. Além disso, alguns fatores experimentais assumiram valores booleanos para que pudessem representar, por exemplo, a presença ou ausência de algum elemento mecânico da semeadora.

Dos 83 trabalhos analisados, 43 foram considerados elegíveis para compor a base de dados e foram publicados entre os anos 2000 e 2016 (Gráfico 1). As publicações selecionadas reuniram um total de 379 observações.

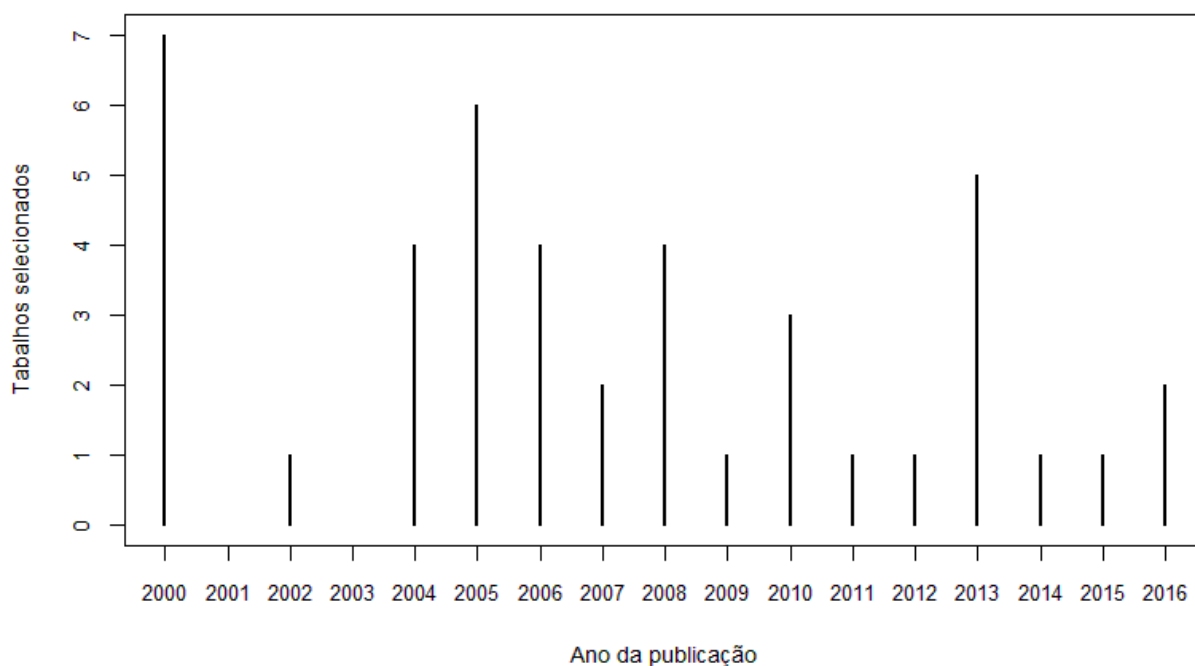


Gráfico 1 – Distribuição de frequência dos trabalhos selecionados.

Para cada observação foram obtidos os respectivos valores para variáveis selecionadas para modelagem (Tabela 2). Os experimentos que forneceram essas observações são referenciados no Anexo A.

Tabela 2 – Medidas de dispersão das variáveis selecionadas.

Variável ⁽¹⁾	Unidade	N	Mínimo	Média	Máximo	Desvio-Padrão
ARE	-	356	0,0590	0,3201	0,8290	0,2053
SIL	-	356	0,0640	0,2333	0,3200	0,0752
ARG	-	362	0,1060	0,4539	0,7940	0,1930
UMI	-	278	0,1100	0,2563	0,4000	0,0871
DEN	Mg.m ⁻³	205	0,9700	1,3480	1,6900	0,2072
RCUL	t.ha ⁻¹	281	0,0000	3,8170	12,9900	2,6541
RPEN	MPa	182	0,9800	1,6970	3,5500	0,5375
PADU	cm	272	2,6000	9,5520	25,0000	3,2340
VEL	Km.h ⁻¹	379	1,3000	5,1860	10,010	1,5884
FLIN	kN.linha ⁻¹	379	0,2500	2,3280	8,4000	1,3816
CONH	L.h ⁻¹	181	2,9400	10,1700	17,6100	3,8786

⁽¹⁾ Teor de areia (ARE), teor de silte (SIL), teor de argila (ARG), teor de água no solo (UMI), densidade do solo (DEN), resíduos culturais de superfície (RCUL), resistência do solo à penetração (RPEN), profundidade de deposição do adubo (PADU), velocidade do conjunto mecanizado (VEL), força de tração específica (FLIN), e consumo horário (CONH).

3.2 MODELAGEM

O modelo utilizado para estimar a força de tração específica demandada por uma semeadora foi definido pela Equação 28,

$$Y_{ijk} = X_{ijk}^T \beta + s_j + \varepsilon_{ijk} \quad (28)$$

em que:

Y_{ijk} = k-ésima observação da força específica;

X_{ijk}^T = matriz transposta de valores das variáveis explanatórias da k-ésima observação;

β = vetor de parâmetros dos efeitos fixos,

s_j = efeito aleatório associado ao j-ésimo estudo, e

ε_{ijk} = erro residual.

Assume-se $\varepsilon_{ijk} \sim N(0, \sigma^2)$, em que σ^2 é a variância residual, e $s_j \sim N(0, \sigma_s^2)$, sendo σ_s^2 a variância entre os experimentos. Todos os modelos foram ajustados por máxima verossimilhança, utilizando o pacote lme4 em ambiente de desenvolvimento para linguagem de programação R (BATES, *et al.*, 2015).

3.2.1 Força de Tração Média

Foram gerados inicialmente 511 modelos simples a partir de todas as possíveis combinações formadas por um subconjunto de p variáveis retiradas de um conjunto de 10 variáveis consideradas neste trabalho. Foram consideradas, portanto, todos os modelos possíveis com dimensões variando de 1 a 9, sendo o total de modelos gerados denotados por $\sum_{p=1}^9 p \cdot \frac{n!}{p!(n-p)!}$.

Desse total, foram selecionados os 10 melhores segundo o critério de informação de Akaike corrigido (AICc). No entanto, importou considerar também as interações entre as variáveis com a finalidade de obter menores erros residuais bem como o atendimento aos pressupostos de normalidade dos resíduos e homocedasticidade.

Dado o limite de esforço computacional, foram analisados apenas 8.490 modelos com interações. Esses modelos possuíam de 2 a 8 variáveis e o número de modelos em função do número de parâmetros p é apresentado na Tabela 3. Os modelos selecionados foram aqueles que tiveram menores valores de AICc, desde que não rejeitada a hipótese de normalidade segundo o teste de Lilliefors.

Tabela 3 – Número de modelos em função do número de parâmetros.

Parâmetros	Número de modelos	Parâmetros	Número de modelos
2	30	6	2.016
3	108	7	2.016
4	432	8	3.024
5	864		

3.2.2 Potência Média

A potência média na barra de tração, requerida para tração de uma semeadora-adubadora foi definida pela Equação 29,

$$P = \frac{F \cdot v}{3,6} \quad (29)$$

em que:

P = potência média requerida na barra de tração (kW);

F = estimativa da força média requerida na barra de tração (kN); e

v = velocidade média do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

3.2.3 Consumo Horário de Combustível

A modelagem do consumo horário seguiu o mesmo procedimento adotado para a modelagem da força específica. Foram gerados inicialmente 511 modelos simples a partir de todas as possíveis combinações formadas por um subconjunto de p variáveis retiradas de um conjunto de 10 variáveis consideradas neste trabalho.

Entre os modelos que atendiam ao pressuposto de normalidade dos resíduos, foram selecionados os 10 melhores segundo o critério de informação de Akaike corrigido (AICc). Importou considerar, no entanto, a rotação do motor uma vez que que essa variável está diretamente relacionada com o consumo de combustível (SILVEIRA, *et al.*, 2013).

3.3 ANÁLISE E SELEÇÃO DE MODELOS

Para cada modelo, foram calculados avaliadores da qualidade de ajuste, a saber: o critério de informação de Akaike (AIC), o critério de informação de Akaike corrigido (AICc), o critério de informação bayesiano (BIC), o coeficiente de determinação ajustado (\bar{R}^2) e o erro quadrático médio (MSE). Além disso, os modelos que apresentavam interações foram avaliados também segundo a distribuição e a variância do erro.

Além de apresentar baixo valor entre os critérios de informação utilizados, a seleção de um modelo parcimonioso considerou os requisitos para sua aplicação no campo, notadamente no que concerne à facilidade de mensuração de determinados atributos físicos do solo para aplicação do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 MODELO DA ASABE

A norma técnica ASAE D497.7 MAR2011 (ASABE, 2011) aplicada a semeadoras-adubadoras, após aplicação dos respectivos parâmetros de máquina, pode ser representado resumidamente pela Equação 30. Depreende-se então que a estimativa da força dada pelo referido modelo, depende apenas da classe textural do solo e do número de linhas da semeadora.

$$D = F_i \cdot 1820 \cdot W \quad (30)$$

em que:

D = força de tração (N);

F_i = parâmetro de solo; e

W = número de linhas da semeadora.

O Gráfico 2 mostra a relação entre a força de tração média medida na barra de tração nos experimentos selecionados e sua estimativa segundo o modelo proposto pela ASABE. Percebe-se a presença de pontos dispersos, alguns bastante discrepantes em relação à linha de identidade, indicando grande divergência entre os valores observados e aqueles previstos pela norma.

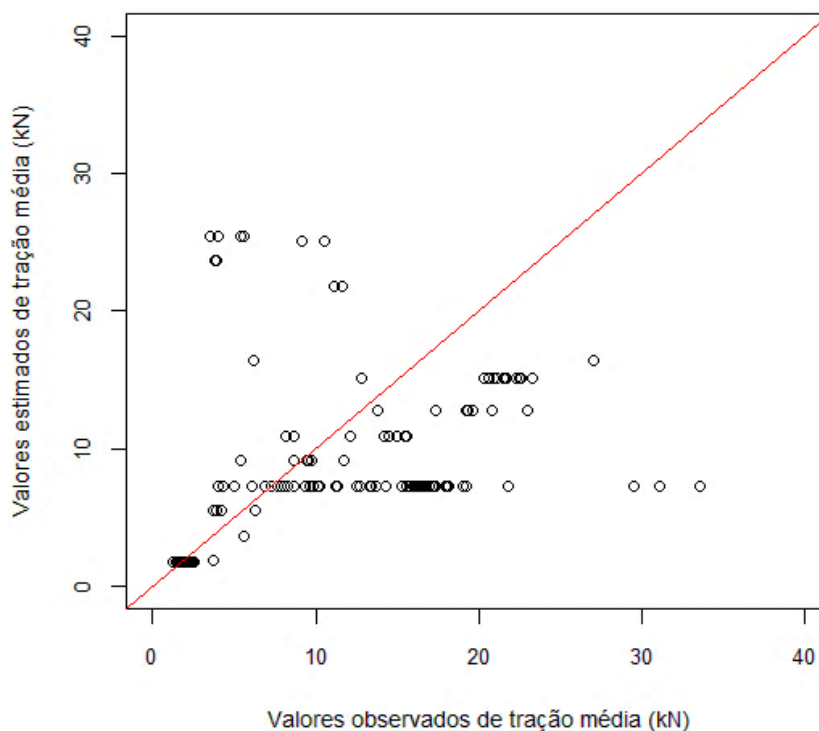


Gráfico 2 – Valores previstos e observados de tração média.

No experimento conduzido por Silveira *et al.* (2005), por exemplo, a força requerida para tracionar uma semeadora-adubadora de arrasto com 14 linhas em solo argiloso foi de 3,56 kN e 5,61 kN, nas velocidades de 5,24 km.h⁻¹ e 7,09 km.h⁻¹, nessa ordem. Contudo, a força requerida na barra de tração segundo a norma da ASABE seria de 25,48 kN, independentemente da velocidade do conjunto. Esse valor é 453% superior ao maior observado no experimento.

É oportuno frisar também a tendência que o modelo indicado na norma tem em subestimar a força média requerida. Entre as semeadoras-adubadoras de arrasto, a tração média estimada pela norma é menor que a observada em 78,3% dos experimentos selecionados. Além disso, apenas 20% dos valores observados estão no intervalo de variação de $\pm 25\%$ previsto pela norma.

Além disso, o erro padrão da estimativa (MSE) é igual 63,51. Ao decompor a estatística segundo a proposta de Kobayashi e Salam (2000), o viés do modelo é de aproximadamente 3,53, confirmando a ocorrência de estimativas de força média de tração sistematicamente inferiores aos valores observados.

4.2 ESTIMATIVA DE FORÇA DE TRAÇÃO

4.2.1 Relação entre as Variáveis

A Tabela 4 apresenta a magnitude e direção da relação linear entre as variáveis analisadas. Percebe-se que fortes correlações estão normalmente associadas aos atributos do solo como composição granulométrica, teor de água e densidade do solo. No que concerne à relação da força média e a força específica com as demais variáveis, predominam correlações moderadas.

Tabela 4 – Matriz de correlação.

	ARE ⁽¹⁾	SIL	ARG	UMI	DEN	RCUL	RPEN	PADU	VEL	FMED	LIN	CONH
ARE	1,00 ⁽²⁾											
SIL	0,78	1,00										
ARG	-0,99	-0,85	1,00									
UMI	-0,94	-0,53	0,90	1,00								
DEN	0,92	0,96	-0,96	-0,74	1,00							
RCUL	-0,27	0,38	0,16	0,58	0,11	1,00						
RPEN	-0,53	0,12	0,42	0,78	-0,16	0,96	1,00					
PADU	-0,39	0,01	0,32	0,53	-0,16	0,59	0,63	1,00				
VEL	0,51	0,20	-0,47	-0,59	0,35	-0,45	-0,55	-0,40	1,00			
FMED	-0,87	-0,37	0,81	0,98	-0,62	0,71	0,87	0,60	-0,61	1,00		
LIN	-0,95	-0,54	0,90	0,99	-0,75	0,57	0,77	0,53	-0,59	0,98	1,00	
CONH	-0,85	-0,37	0,79	0,95	-0,60	0,68	0,84	0,55	-0,48	0,96	0,95	1,00

⁽¹⁾ Teor de areia (ARE), teor de silte (SIL), teor de argila (ARG), teor de água no solo (UMI), densidade do solo (DEN), resíduos culturais de superfície (RCUL), resistência do solo à penetração (RPEN), profundidade de deposição do adubo (PADU), velocidade do conjunto mecanizado (VEL), força de tração média (FMED), número de linhas da semeadora (LIN), e consumo horário (CONH).

⁽²⁾ As cores denotam classes de correlação. A cor verde indica correlação muito forte ($0,80 \leq r \leq 1,00$); a cor amarela, correlação forte ($0,60 \leq r < 0,80$); a cor rosa, correlação moderada ($0,40 \leq r < 0,60$) (LARSON; FARBER, 2010).

A resistência mecânica do solo à penetração é influenciada pelo sistema de manejo e pela compactação pelos rodados dos tratores, pelo desenvolvimento radicular, entre outros. Nisso, a composição granulométrica e a teor de água determinam o comportamento compressivo dos diferentes solos (BODMAN; CONSTANTIN, 1965).

Com relação à granulometria, a Tabela 4 aponta para uma correlação moderada entre a resistência do solo e os teores de areia e argila, com $r = -0,53$ e $r = 0,42$, nessa ordem. A partir da correlação positiva associada ao percentual de argila, pode-se inferir acerca da maior susceptibilidade de solos argilosos à compactação, conforme aponta Imhoff (2002). Impende considerar, no entanto, que a presença de diferentes frações granulométricas favorece a compactação por meio do rearranjo das partículas de diferentes tamanhos, bem como o preenchimento ou exclusão dos poros (MANTOVANI, 1987).

A associação positiva entre a resistência e a quantidade de palha na superfície do solo pode ser atribuída às condições impostas pelo plantio direto. No experimento conduzido por Furlani *et al.* (2008), o solo cultivado sob esse sistema apresentou maior resistência aos mecanismos sulcadores da semeadora, sendo o esforço na barra de tração 53% maior do que no preparo convencional.

A força de tração média e o teor de argila do solo possuem correlação positiva muito forte ($r = 0,81$), indicando que o incremento na demanda de força está comumente relacionado a maiores percentuais de argila no solo. O contrário se observa em solos arenosos ($r = -0,87$), nos quais o efeito das forças inerciais sobre os órgãos de ataque possui maior significância (LUTH; WISMER, 1972). Collins e Fowler (1996), por sua vez, observaram maiores demandas de tração ao realizar semeadura direta em solo com maior fração de argila. Resultados semelhantes foram obtidos por Darmora e Pandey (1995).

Observa-se ainda uma associação positiva entre a teor de água e a forças média e específica ($r = 0,98$ e $r = 0,99$, respectivamente), o que pode ser explicada pela força de atrito entre solo e os órgãos de ataque. Segundo Gill e Vanden Berg (1968), o incremento no teor de água no solo leva a um aumento da força de atrito devido à maior coesão que atua no sentido de aumentar a força normal na superfície de deslizamento. O excesso de teor de água, por outro lado, produz um efeito lubrificante, no qual o atrito entre o solo e o metal tende a diminuir, principalmente em solos arenosos.

O experimento conduzido por Cepik, Trein e Levien (2005) mostrou bem essa relação. Ao se aumentar a profundidade de atuação das hastes sulcadoras de uma

semeadora em solo friável, houve um incremento de 130% na força requerida na barra de tração. Em solos seco e úmido, no entanto, esse aumento foi de 84 e 75%, nessa ordem.

A Tabela 4 também apresenta as associações positivas forte e moderada entre a profundidade de atuação do elemento sulcador de adubo e as forças média e específica, com coeficiente de correlação amostral de 0,60 e 0,53, respectivamente. Essa relação foi observada por Silveira *et al.* (2013) que obtiveram menores exigências de força com o aumento da profundidade de atuação das hastes sulcadores em solo muito argiloso.

Nesse experimento, menores profundidades de deposição de adubo foram obtidas quando o conjunto mecanizado operava em velocidades maiores. A Tabela 4 confirma a direção da correlação entre essas duas variáveis, porém, em uma relação moderada ($r = -0,40$). Modolo *et al.* (2004) obtiveram maiores profundidades de deposição de sementes em maiores velocidades de operação em solo argiloso.

Assim, na literatura o efeito da velocidade apresenta sobre o esforço médio na barra de tração varia. O incremento na velocidade resultou no aumento da força de tração nos trabalhos de Siqueira *et al.* (2001), Silveira *et al.* (2005), Bortolotto, Pinheiro Neto e Bortolotto (2006b), Mahl (2006) e Furlani *et al.* (2008). A relação inversa foi obtida por Silveira *et al.* (2013) ao passo que, no mesmo solo, Modolo *et al.* (2004) não observaram efeito significativo da velocidade de operação sobre a demanda de tração.

Com relação ao consumo horário, a Tabela 4 apresenta correlações muito fortes entre essa variável e as forças média e específica, com $r = 0,96$ e $r = 0,95$, nessa ordem. Houve também correlação moderada quando considerado o efeito da profundidade de trabalho do mecanismo sulcador, com $r = 0,55$. Experimento conduzido por Palma *et al.* (2010) em solo de textura muito argilosa sob plantio direto, foram observados maiores consumos de combustível e maiores esforços de tração com o aumento da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras.

4.2.2 Modelagem da Força Específica de Tração

4.2.2.1 Modelos sem Interação

Foram gerados 511 modelos simples para estimação da força específica a partir de todas as combinações possíveis de parâmetros de um modelo completo. Esses parâmetros foram estimados por máxima verossimilhança e os modelos foram ordenados segundo os menores valores de AICc.

O Gráfico 3 mostra os menores valores de AICc encontrados para cada conjunto de modelos com mesmo número de parâmetros. Percebe-se que o menor valor de AICc pertence a um modelo com 5 termos variáveis ($\min[AICc(k = 5)] = 110,7729$). Para modelos com mais de 5 coeficientes, a função de penalidade passa a ter um peso maior.

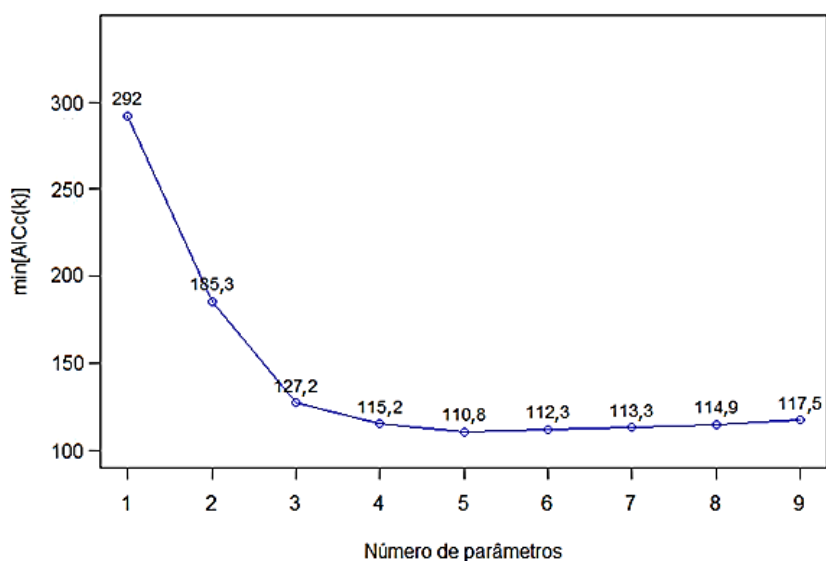


Gráfico 3 – AICc mínimo em função do número de parâmetros.

Entre os modelos com apenas um termo variável, foram obtidos valores de AICc bastante discrepantes. O maior valor foi 788,6244, quando a variável independente foi a velocidade, ao passo que o menor ($AICc = 292,0220$) corresponde ao modelo cuja variável é a profundidade de atuação do mecanismo sulcador.

A Tabela 5 apresenta as estimativas dos coeficientes dos 10 melhores modelos selecionados segundo os menores valores de AICc. É possível notar que os termos densidade do solo (DEN), quantidade de resíduos culturais (RCUL), profundidade de

atuação do mecanismo sulcador (PADU) e velocidade (VEL) estão presentes em todos os modelos indicados.

Tabela 5 – Coeficientes dos modelos de força específica.

Modelo	Intercepto	ARE	SIL	ARG	UMI	DEN	RCUL	RPEN	PADU	VEL
F323	1,027	-3,090	-	-	-	0,346	0,012	-	0,129	0,059
F358	2,647	-	2,264	-	-	-1,780	0,019	-	0,130	0,059
F458	2,399	-	7,272	-	-	-2,916	0,008	0,441	0,129	0,059
F437	1,367	-1,906	-	-	-	-0,433	0,012	0,222	0,130	0,059
F434	0,123	-2,003	-	-	2,166	0,324	0,010	-	0,129	0,059
F414	1,088	-3,034	0,791	-	-	0,175	0,012	-	0,129	0,058
F429	1,879	-3,825	-	-0,791	-	0,175	0,012	-	0,129	0,058
F450	-1,946	-	3,825	3,034	-	0,175	0,012	-	0,129	0,058
F478	1,088	-3,034	0,791	-	-	0,175	0,012	-	0,129	0,058
F455	-0,208	-	1,147	-	4,241	-0,446	0,009	-	0,129	0,059

Teor de areia (ARE), teor de silte (SIL), teor de argila (ARG), teor de água no solo (UMI), densidade do solo (DEN), resíduos culturais de superfície (RCUL), resistência do solo à penetração (RPEN), profundidade de deposição do adubo (PADU), velocidade do conjunto mecanizado (VEL).

Tanto a profundidade de atuação do mecanismo sulcador (PADU) quanto a velocidade (VEL) sofreram pouca variação ao passo que, dependendo do modelo, a o incremento na densidade do solo poderia contribuir quer para aumento quer para a diminuição da demanda de tração específica. O valor negativo para as estimativas dos coeficientes para o termo teor de areia (ARE) apontam para a contribuição da variável para a redução do esforço de tração.

A Tabela 6 apresenta as estimativas dos avaliadores dos modelos selecionados. Percebe-se que esses modelos apresentam coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2) de 87%, indicando um bom ajuste do modelo à amostra. Houve ainda pouca diferença quanto ao erro padrão da estimativa (MSE) dos modelos selecionados.

Tabela 6 – Avaliadores dos modelos de força específica.

Modelo	MSE	R_{aj}²	AIC	BIC	AICc
F323	2,765	0,871	108,8	128,2	110,77
F358	2,758	0,870	110,1	129,4	112,01
F458	2,765	0,873	109,8	131,6	112,27
F437	2,766	0,872	110,3	132,1	112,80
F434	2,764	0,872	110,7	132,5	113,15
F414	2,764	0,871	110,8	132,6	113,28
F429	2,764	0,871	110,8	132,6	113,28
F450	2,764	0,871	110,8	132,6	113,28
F478	2,764	0,871	110,8	132,6	113,28
F455	2,761	0,871	110,9	132,7	113,39

Observando os critérios de informação na mesma tabela, os valores de AICc são maiores que os de AIC devido ao maior peso da função penalidade naquele critério. Por exemplo, o modelo F458, com 6 termos de variáveis, apresentou valor de AIC menor que o modelo F358, o qual possui 5 termos. Os valores de BIC foram ainda maiores em relação aos demais critérios por utilizar o logaritmo natural do número de amostras como penalização.

4.2.2.2 Diagnósticos de Regressão

A verificação das suposições de normalidade dos resíduos e homocedasticidade do modelo F323, de menor valor AICc, é representada nas figuras seguintes. O histograma dos resíduos (Gráfico 4) apresenta colunas isoladas nas extremidades, indicando a presença de valores discrepantes.

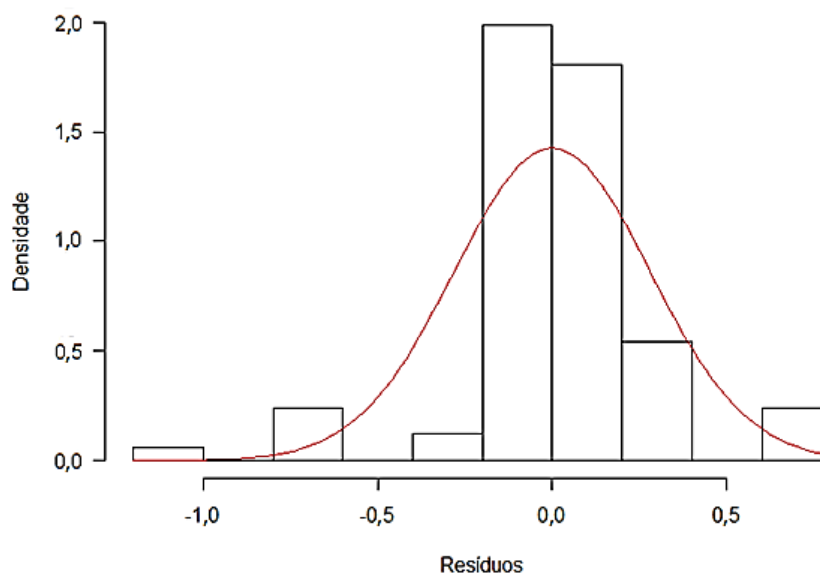


Gráfico 4 – Histograma de resíduos.

O gráfico de resíduos (Gráfico 5) mostra os indícios acerca do comportamento da variância dos resíduos em relação aos valores ajustados. Além da presença de alguns pontos discrepantes, os pontos do gráfico não estão distribuídos aleatoriamente em torno da reta que representa o resíduo nulo, indicando possível violação da hipótese de homocedasticidade. Nos dez modelos referidos acima, o gráfico de resíduos apresentou distribuição semelhante, sendo necessário o teste de combinações multiplicativas de termos de variáveis.

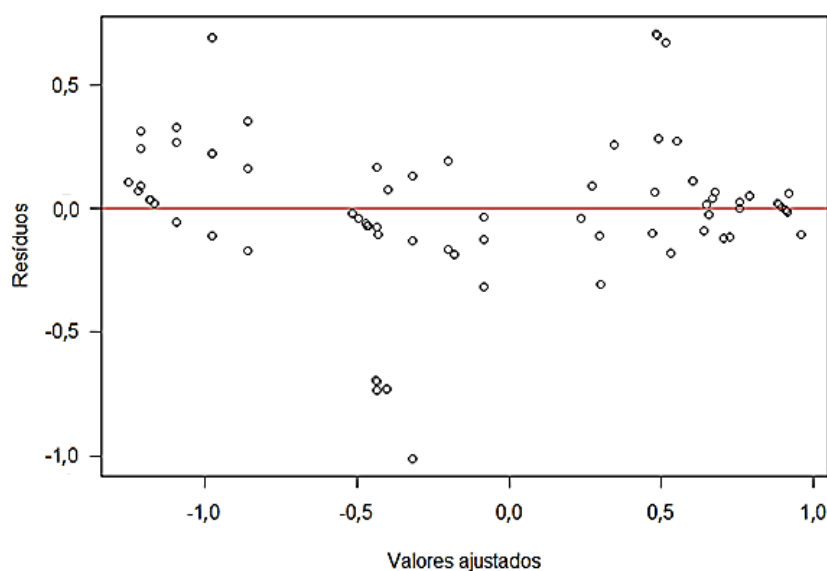


Gráfico 5 – Resíduos do modelo F323.

No gráfico quantil-quantil da normal (Gráfico 6) a reduzida inclinação da linha de referência indica elevada concentração de dados em torno da média. Além disso, percebe-se a presença de fuga nos extremos. Os testes de normalidade de Lilliefors e de Shapiro-Wilk, por sua vez, apresentaram valores P iguais a $1,331 \cdot 10^{-6}$ e $4,678 \cdot 10^{-7}$ respectivamente, rejeitando a hipótese de normalidade da distribuição dos resíduos. Logo, a distribuição das estimativas de força específica do referido modelo condicional ao efeito de suas variáveis explicativas não é normal.

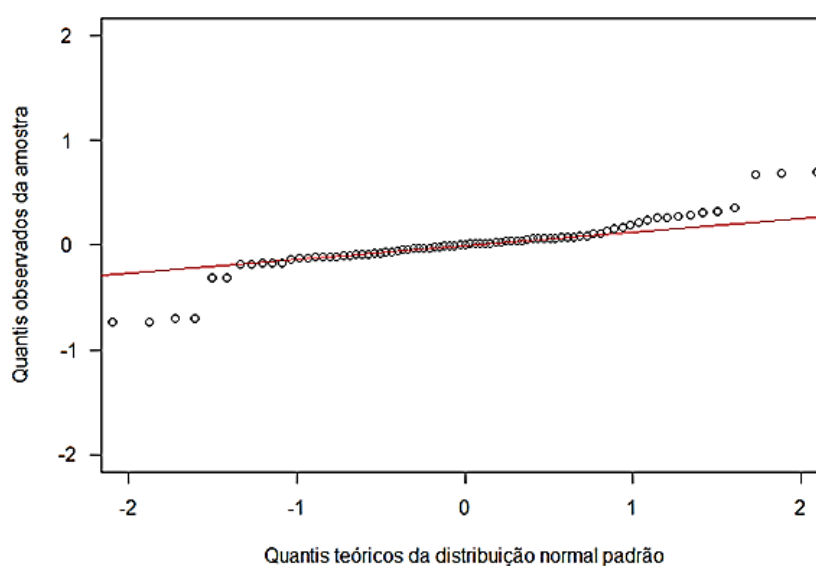


Gráfico 6 – Quantil-quantil da normal para o modelo F323.

Dos 511 modelos, apenas 10 atenderam aos pressupostos de normalidade dos resíduos (Tabela 7). Os modelos indicados na tabela possuem valores de AICc cerca de 1,9 vezes superior àqueles 10 modelos com menores valores para o mesmo critério (Tabela 6).

Tabela 7 – Modelos de força específica com resíduos normalmente distribuídos.

Modelo	MSE	R_{aj}²	AIC	BIC	AICc	Valor P ⁽¹⁾
F285	3,191	0,728	212,2	234,5	213,45	0,092
F305	3,191	0,728	212,2	234,5	213,45	0,092
F340	3,191	0,728	212,2	234,5	213,45	0,092
F396	3,191	0,728	212,2	234,5	213,45	0,092
F111	2,779	0,689	236,7	254,3	237,33	0,077
F180	3,192	0,728	210,5	230,0	211,45	0,065
F215	3,190	0,728	210,2	229,8	211,19	0,059
F377	2,352	0,749	196,8	218,3	198,23	0,055
F350	3,198	0,729	211,2	233,6	212,53	0,052
F315	3,200	0,729	211,6	233,9	212,84	0,052

⁽¹⁾ Teste de Lilliefors.

Comparando as referidas tabelas, percebe-se menores valores de AIC, AICc e BIC não implicaram em modelos que atendam ao pressuposto de normalidade dos resíduos. Por outro lado, o incremento nesses critérios correspondeu à redução do coeficiente de determinação ajustado e ao aumento do erro padrão da estimativa.

4.2.2.3 Modelos com Interação de Termos Variáveis

Embora fossem encontrados modelos simples que atendessem ao pressuposto de normalidade dos resíduos, eles apresentavam ainda uma falta de ajuste em relação aos dados, conforme observado na Tabela 7. Apresentavam ainda valores superiores de AIC, AICc e BIC, além de menor coeficiente de determinação ajustado.

A Tabela 8 apresenta 5 modelos com interações de termos variáveis com menores valores de AICc entre aqueles que não tiveram a hipótese de normalidade dos resíduos rejeitada. As equações dos referidos modelos são apresentadas no Anexo B.

Tabela 8 – Coeficientes dos modelos de força específica com interação.

Modelo	Intercepto	Efeitos fixos						Interações	
		ARE	SIL	DEN	RCUL	PADU	VEL		
F8150	-1,494	-	-	1,666	-0,192	0,641	0,081	RCUL·PADU 0,020	DEN·PADU -0,386
F1537	-6,188	-1,820	-	4,659	0,006	0,965	0,121	VEL·ARE -0,100	DEN·PADU -0,553
F5382	2,535	-	3,398	-1,182	-0,303	0,171	0,063	RCUL·PADU 0,031	PADU·SIL -0,691
F1544	-5,876	-	0,524	3,991	0,007	0,978	0,187	VEL·SIL -0,430	DEN·PADU -0,560
F7252	-5,663	-1,676	-	4,238	0,072	0,931	0,082	RCUL·ARE -0,153	DEN·PADU -0,531

Teor de areia (ARE), teor de silte (SIL), densidade do solo (DEN), resíduos culturais de superfície (RCUL), profundidade de deposição do adubo (PADU), velocidade do conjunto mecanizado (VEL).

Os avaliadores dos modelos indicados são apresentados na Tabela 9. Analisando a tabela, percebe-se que os critérios de informação tiveram valores menores quando comparados com os modelos sem interação relacionados na Tabela 6. Nesta tabela, o menor valor de AICc foi de 198,23 ao passo que, na Tabela 9, foi de 67,85.

Tabela 9 – Avaliadores dos modelos de força específica com interação.

Modelo ⁽¹⁾	Valor P ⁽²⁾	MSE	R _{aj} ²	AIC	BIC	AICc
F8150	0,066	2,933	0,934	65,6	88,0	67,85
F1537	0,061	2,823	0,938	65,0	89,2	68,09
F5382	0,107	2,801	0,937	65,2	89,4	68,22
F1544	0,054	2,823	0,937	65,3	89,5	68,40
F7252	0,062	2,827	0,936	66,3	90,5	69,40

⁽¹⁾ Os modelos estão relacionados em ordem crescente de valores de AICc.

⁽²⁾ Teste de Lilliefors.

O melhor ajuste associado à interação de termos variáveis não se traduziu apenas em menores valores de critérios de informação. Na Tabela 9, o coeficiente de determinação ajustado variou de 93,4% a 93,8% indicando que pouco mais de 93% dos dados experimentais podem ser explicados pelos modelos relacionados na tabela.

O modelo F8150, por exemplo, é o mais parcimonioso e apresenta fácil aplicação no campo, sendo denotada pela Equação 31:

$$\begin{aligned} Flin = & -1,494 + 1,666 \cdot Den - 0,192 \cdot Rcul + 0,641 \cdot Padu + 0,081 \cdot Vel \\ & + 0,020 \cdot Rcul \cdot Padu - 0,386 \cdot Den \cdot Padu \end{aligned} \quad (31)$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

As variáveis do modelo indicado utilizam unidades comumente empregadas, não somente no campo, mas também nos trabalhos analisados. A equação também pode ser utilizada para calcular a força média na barra de tração, bastando multiplicar *Flin* pelo número de linhas da semeadora-adubadora.

Não se modelou especificadamente a força média pois o algoritmo do método de máxima verossimilhança não convergiu em maior parte dos modelos. A grande diferença observada no número de linhas dos experimentos selecionados em relação às demais variáveis poderia explicar o problema.

Analisando a Equação 31, o incremento das variáveis densidade, profundidade de atuação dos mecanismos sulcadores e velocidade leva ao aumento da demanda de força de tração específica e, conseqüentemente da força de tração média requerida na barra de tração.

No que concerne ao atendimento dos pressupostos de normalidade, observou-se uma melhor distribuição dos resíduos do referido modelo em comparação aos modelos sem interação de termos variáveis. O Gráfico 7 mostra o histograma dos resíduos, o qual não apresenta qualquer assimetria tampouco colunas isoladas nas extremidades. O gráfico de resíduos (Gráfico 8), por sua vez, não aponta para violação do critério de homocedasticidade.

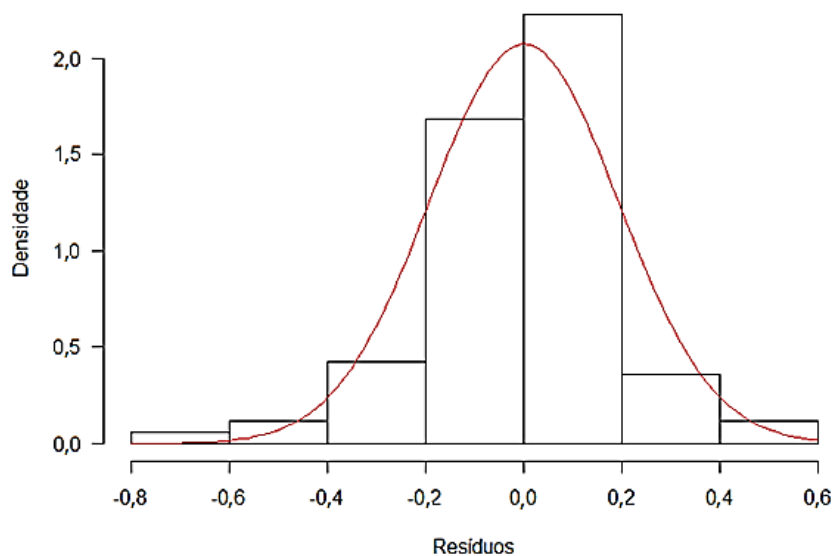


Gráfico 7 – Histograma do modelo F8150.

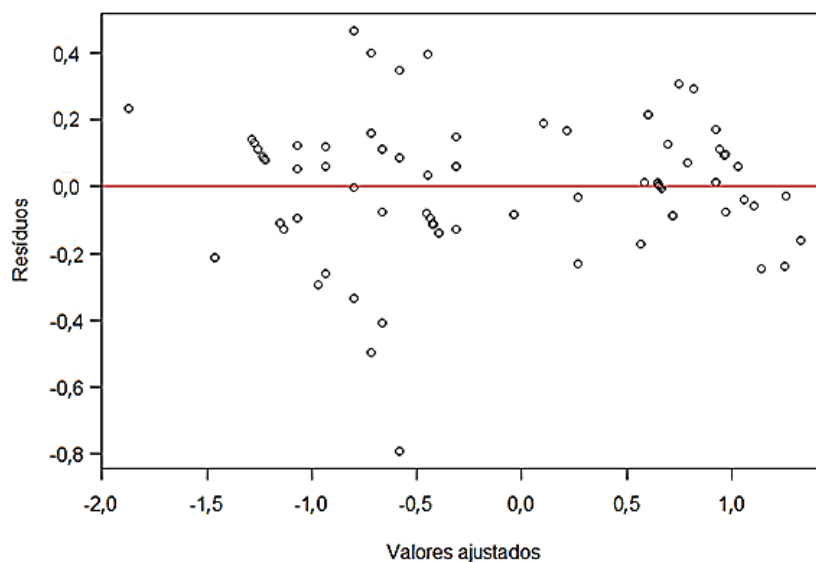


Gráfico 8 – Gráfico dos resíduos do modelo F8150.

4.2.3 Modelagem do Consumo de Combustível

4.2.3.1 Modelos sem Interação

Dos 511 modelos gerados, 72 atenderam aos pressupostos de normalidade dos resíduos. A Tabela 10 apresenta os modelos com menores valores de AICc entre aqueles que apresentaram distribuição normal dos resíduos. Percebe-se que o coeficiente de determinação foi elevado, sendo que os modelos indicados podem explicar 90% da variação dos dados.

Tabela 10 – Modelos de consumo com resíduos normalmente distribuídos.

Modelo	MSE	R_{aj}²	AIC	BIC	AICc	Valor P ⁽¹⁾
C381	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C437	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C458	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C464	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C465	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C486	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C492	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C493	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C499	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16
C500	50,801	0,899	89,2	103,4	93,28	0,16

⁽¹⁾ Teste de Lilliefors.

Os coeficientes desses modelos são apresentados na Tabela 11. De acordo com a tabela, as variáveis rotação do motor e profundidade de atuação dos mecanismos sulcadores apresentam parâmetros com valores bastante reduzidos (0,005 e -0,005, respectivamente), o que indica pouca influência dessas variáveis no consumo horário de combustível. Experimento conduzido por Queiroz *et al.* (2016) com uma semeadora-adubadora atuando em solo argiloso, não resultou em alteração do consumo energético com a adoção do escalonamento de marchas.

Tabela 11 – Coeficientes dos modelos de consumo horário.

Modelo	Inter.	ARE	SIL	ARG	UMI	DEN	ROT	RPEN	PADU	VEL
C381	-7,721	-	-	-	-	-12,940	0,005	14,250	-0,005	0,818
C437	-21,740	-47,850	-	-	-	-21,950	0,005	-	-0,005	0,818
C458	18,310	-	291,900	-	-	-68,770	0,005	-	-0,005	0,818
C464	-86,810	-	-	57,230	-	39,740	0,005	-	-0,005	0,818
C465	-22,740	-	-	-	59,250	1,753	0,005	-	-0,005	0,818
C486	-12,050	-36,270	70,640	-	-	-	0,005	-	-0,005	0,818
C492	58,590	-106,900	-	-70,640	-	-	0,005	-	-0,005	0,818
C493	-22,830	4,152	-	-	64,400	-	0,005	-	-0,005	0,818
C499	-48,320	-	106,900	36,270	-	-	0,005	-	-0,005	0,818
C500	-21,720	-	7,256	-	57,780	-	0,005	-	-0,005	0,818

Teor de areia (ARE), teor de silte (SIL), teor de argila (ARG), teor de água no solo (UMI), densidade do solo (DEN), rotação do motor (ROT), resistência do solo à penetração (RPEN), profundidade de deposição do adubo (PADU), velocidade do conjunto mecanizado (VEL).

Entre os modelos selecionados, aqueles que consideravam o teor de areia do solo tinham o respectivo parâmetro negativo na maioria dos casos. O contrário se observa para o teor de argila, cujo parâmetro é positivo. Isso também foi observado quando a variável independente era a força específica.

Deve-se considerar ainda que maior teor de areia está associado a solos menos estruturados, especialmente no cultivo convencional. Nesse caso, pode-se ocorrer maior patinação dos rodados e conseqüentemente o aumento do consumo de combustível.

O modelo C437, por exemplo, não atendeu ao pressuposto heterocedasticidade. Observado o Gráfico 9, percebe-se que os resíduos apresentam um padrão de dispersão, sugerindo um poder explanatório associado ao erro, o que não é desejável. O mesmo comportamento é observado para os demais modelos da Tabela 11.

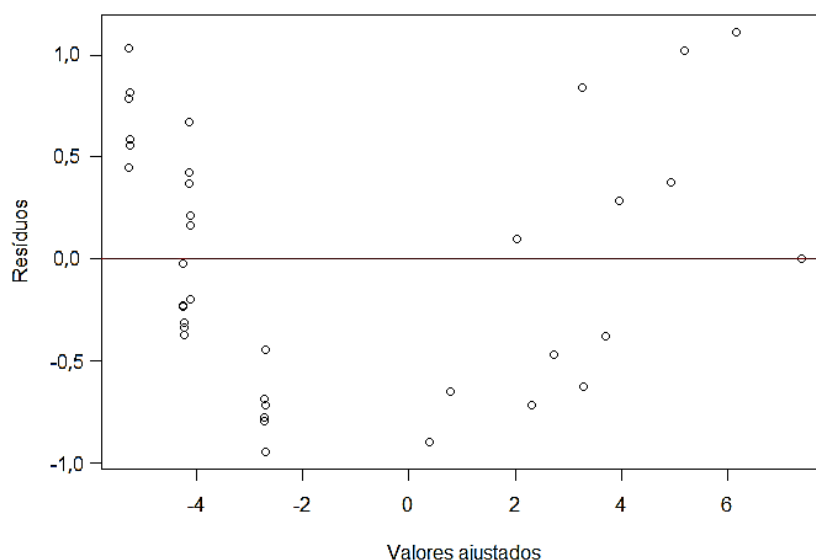


Gráfico 9 – Resíduos do modelo C437.

As interações não puderam ser consideradas neste trabalho devido ao número insuficiente de observações concernentes ao consumo horário de combustível, disponíveis na literatura. A utilização dessas observações para construção de modelos com interação de termos variáveis poderia levar a parâmetros instáveis e que poderiam sofrer grande variação na medida que surgirem novos trabalhos que avaliem o consumo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os atributos do solo devem ser considerados para avaliação da demanda energética de semeadoras-adubadoras. O modelo da ASABE considera apenas a classe granulométrica e o número de linhas para estimar a demanda de força na barra de tração. Tal modelo pode incorrer em previsões bastante discrepantes quando comparados aos dados experimentais, notadamente quando utilizadas máquinas de semeadura contínua, com grande número de órgãos ativos.

Ao considerar os atributos do solo como frações granulométricas, densidade do solo, massa de resíduos culturais de superfície, além de regulagens como velocidade e atuação dos sulcadores, é possível reduzir a variabilidade na previsão do modelo. Essa variabilidade constitui sobretudo o erro que levaria à menor precisão no dimensionamento de máquinas e implementos de uma propriedade rural.

O modelo proposto neste trabalho para previsão da força de tração específica apresentou menor erro de previsão quando comparado à equação proposta pela ASABE. Tal modelo foi denotado por:

$$Flin = -1,494 + 1,666 \cdot Den - 0,192 \cdot Rcul + 0,641 \cdot Padu + 0,081 \cdot Vel + 0,020 \cdot Rcul \cdot Padu - 0,386 \cdot Den \cdot Padu$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

O erro padrão do modelo foi de 2,93, ao passo que o referido avaliador para a norma técnica foi de 63,51. Além disso, o modelo mostra, através de seus coeficientes, a influência de outras variáveis que devem ser consideradas na previsão da demanda de força, como a densidade do solo, resíduos culturais, profundidade de trabalho do mecanismo sulcador de adubo e velocidade.

Por fim, os critérios de informação se mostraram eficientes na escolha de modelos, alternativamente ao uso de significância estatística. No entanto, importará considerar em futuros trabalhos a necessidade de validar o modelo a partir de novos experimentos em diferentes regulagens e condições de solo.

REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.

AKAIKE, H. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: PETROV, B.N.; CSAKI, F. (Org.). **Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory**. Budapest: Akademiai Kiado, p. 267–281, 1973.

ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Máquinas para semear. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 2, p. 10-11, 2001.

ASABE – American Society of Agricultural and Biological Engineers. Agricultural machinery management data. **ASABE Standards 2011**. St. Joseph, Michigan, 2011. 9 p. (ASAE D497.7MAR2011)

BALASTREIRE, L.A. **Máquinas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.

BALBUENA, R.H.; MEDEVIL, G.O.; RESSIA, J.M. Cobertura del suelo y características de labor de escarificadores con cuchillas circulares y rejas convencionales. In: BALBUENA, R.H.; BENEZ, S.H.; JORAJURÍA, D. (Org.). **Ingeniería rural y mecanización agraria en el ámbito latinoamericano**. La Plata: Editorial de la UNLP, 1998. p. 137–42.

BARATELLI, J.C.; SILVA, D.C.; ZERBINATI, M.T. Gestão da Mecanização. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 112, p. 22-23, 2011.

BARIONI, L.G.; VELOSO, R.F.; MARTHA JUNIOR, G.B. Modelos matemáticos aplicados a sistemas de produção animal em pastagens. In: SIMPOSIO SOBRE O MANEJO ESTRATEGICO DA PASTAGEM, 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: UFV 2002. p. 235-278.

BATES, D.M.; MÄCHLER, M.; BOLKER, B.M.; WALKER, S.C. Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015.

BATES, D.M.; DEBROY, S. Linear mixed models and penalized least squares. **Journal of Multivariate Analysis**, v. 91, n. 1, p. 1–17, 2004.

BODMAN, G.B.; CONSTANTIN, G.K. Influence of particle size distribution in soil compaction. **Hilgardia**, v. 36, n. 15, p. 567–591, 1965.

BOLTZMANN, L. Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze des mechanischen Wärmethorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung, respective den Sätzen über das Wärmegleichgewicht. **Wiener Berichte**, n. 76, p. 373–435, 1877.

BORTOLOTTTO, V.C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTTO, M.C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 122–130, 2006.

BOWERS JUNIOR, C.G. Southeastern tillage energy data and recommended reporting. **Transactions of the ASAE**, v. 28, n. 3, p. 731–737, 1985.

BOZDOGAN, H. Model selection and Akaike's Information Criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. **Psychometrika**, v. 52, n. 3, p. 345–370, 1987.

BRANQUINHO, K.B.; FURLANI, C.E.A.; LOPES, A.; SILVA, R.P.; GROTTA, D.C.C.; BORSATTO, E.A. Desempenho de uma semeadora-adubadora direta, em função da velocidade de deslocamento e do tipo de manejo da biomassa da cultura de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 374–380, 2004.

BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. **Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach**. 2. ed. Nova York: Springer-Verlag, 2002.

CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R.; ARAÚJO, A.G.; RALISCH, R.. **Dinâmica de semeadoras-adubadoras diretas em Primeiro de Maio**, PR. Londrina, PR: IAPAR, 2000.

CASÃO JÚNIOR, R.; PALLEROSI, C.A.; PORTELLA, J.A. Dispositivo pneumático para redução dos erros de dosagem e deposição de sementes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26., 1997, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. 1 CD.

CASELLA, G.; BERGER, R.L. **Inferência estatística**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

CEPIK, C.T.C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. 118 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

CEPIK, C.T.C.; TREIN, C.R.; LEVIEN, R. Força de tração e volume de solo mobilizado por haste sulcadora em semeadura direta sobre campo nativo, em função do teor de água no solo, profundidade e velocidade de operação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 447–457, 2005.

CHORLEY, R.J. Geography and analogue theory. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, n. 1, p. 127–137, 1964.

CHORLEY, R.J.; HAGGETT, P. **Models in geography**. Londres: Methuen, 1967.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blucher, 1999.

COELHO, J.L.D. **Avaliação de elementos sulcadores para semeadoras-adubadoras utilizadas em sistemas conservacionistas de manejo do solo**. Campinas: Unicamp, 1998. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

COLLINS, B.A.; FOWLER, D.B. Effect of soil characteristics, seeding depth, operating speed, and opener design on draft force during direct seeding. **Soil and Tillage Research**, v. 39, n. 3–4, p. 199–211, 1996.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra de Grãos**: Safra 2017/2018, v. 5, n. 6, 2018.

CORRÊA, I.M.; YANAI, K.; MAZIERO, J.V.G.; MOLINA JÚNIOR, W.F. Trator agrícola equipado alternadamente com pneu radial de baixa pressão e pneu diagonal: desempenho comparativo. **Engenharia Agrícola**, v.17, n.2, p.64-70, 1997.

COVER, T.M.; THOMAS, J.A. **Elements of information theory**. Nova York: John Wiley & Sons, 1991.

CRAMÉR, H. **Elementos da teoria de probabilidade e algumas de suas aplicações**. São Paulo: Mestre Jou, 1973.

DARMORA, D.P.; PANDEY, K.P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed and fertiliser drills. **Soil and Tillage Research**, v. 34, n. 2, p. 127–139, 1995.

DEEKS, J.J. Issues in the selection of a summary statistic for meta-analysis of clinical trials with binary outcomes. **Statistics in Medicine**, v. 21, n. 11, p. 1575–1600, 2002.

DICKEY, E.C. No-till planting equipment. In: MidWest Plan Service (Org.) **Conservation tillage systems and management**. Ames: Iowa State University, 1992, p.93-95.

DICKEY, E.C; JASA, P.; GRISSO, R. Long term tillage effects on grain yield and soil properties in a soybean/grain sorghum rotation. **Journal of Production Agriculture**, v. 7, n. 4, p. 465–470, 1994.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc, 1998.

EFRON, B. Bootstrap methods: another data look at the jackknife. **The Annals of Statistics**, v. 7, p. 1–26, 1979.

EFRON, B. Estimating the error rate of a prediction rule: improvement on cross-validation. **American Statistical Association**, v. 78, p. 316–331, 1983.

FAGANELLO, A.; DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; SATTTLER, A. **Efeito de mecanismos sulcadores de solo em semeadoras para plantio direto em pequenas unidades produtivas**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, n. 55, 2008. 13p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento)

FAGANELLO, A.; KOCHHANN, R.A.; PORTELLA, J. A. Desenvolvimento de mecanismos de corte para semeadoras de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21., 1992, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria, RS: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1992. p. 1262-1271.

FERNANDES, H.C.; SILVEIRA, J.C.M.; RINALDI, P.C.N. Avaliação do custo energético de diferentes operações agrícolas mecanizadas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1582–1587, 2008.

FLEISS, J.L.; BERLIN, J.A. Effect sizes for dichotomous data. In: COOPER, H.; HEDGES, L.V.; VALENTINE, J.C. (Org.). **The handbook of research synthesis and meta-analysis**. 2. ed. Nova York: Russell Sage Foundation, 2009. p. 237–235.

FORSTER, M.; SOBER, E. How to tell when simpler, more unified, or less *ad hoc* theories will provide more accurate predictions. **The British Journal for the Philosophy of Science**, v. 45, n. 1, p. 1–35, 1994.

FORSTER, M.; SOBER, E. Why Likelihood? In: TAPER, M.L.; LELE, S.R. (Org.). **The nature of scientific evidence: statistical, philosophical, and empirical considerations**. Chicago: University of Chicago Press, 2004. p. 153–190.

FURLANI, C.E.A.; GAMERO, C.A.; LEVIEN, R.; LOPES, A.; SILVA, R.P. Desempenho operacional de uma semeadora adubadora de precisão em função do preparo do solo e do manejo da cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 388–395, 2004.

FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; CARVALHO FILHO, A.; CORTEZ, J.W.; GROTTA, D.C.C. Semeadora-adubadora: exigências em função do preparo do solo, da pressão de inflação do pneu e da velocidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 345–352, 2008.

FURLANI, C.E.A.; CANOVA, R.; CAVICHIOLI, F.A.; BERTONHA, R.S.; SILVA, R.P. Demanda energética por semeadora-adubadora em função da haste sulcadora na semeadura do milho. **Revista Ceres**, v. 60, n. 6, p. 885–889, 2013.

GABRIEL FILHO, A.; SILVA, S.L.; MODOLO, A.J.; SILVEIRA, J.C.M. Tractor performance in soil with different types of plants covering. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 3, p. 781–789, 2004.

GAMERO, C.A.; LANÇAS, K.P. Ensaio e certificação das máquinas de mobilização periódica do solo. In: MIALHE, L.G. (Org.). **Máquinas agrícolas: ensaio e certificação**. Piracicaba, SP: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1996. p. 463–514.

GAMERO, A.C. **Desempenho operacional de um subsolador de hastes com curvatura lateral (“Paraplow”) em função de diferentes velocidades de deslocamento e profundidades de trabalho**. Botucatu: UNESP, 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

GAUCH JUNIOR, H.G.; HWANG, J.T.G.; FICK, G.W. Model evaluation by comparison of model-based prediction and measured values. **Agronomy Journal**, v. 95, n. 6, p. 1442–1446, 2003.

GILL, W.R.; VANDEN BERG, G.E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: USDA, 1968.

GLASS, G.V. Primary, secondary, and meta-analysis of research. **Educational Researcher**, v. 5, n. 10, p. 3, 1976.

GRISSE, R.D.; KOCHER, M.F.; VAUGHAN, D.H. Predicting tractor diesel fuel consumption. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 5, p. 553–561, 2004.

GROTTA, D.C.C.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; LOPES, A.; REIS, G.N. Seeder fertilizer machine: energetic demand as a function of vegetal covering handling and manure deposition shank depth in no-tillage system. **Engenharia Agrícola**, 5, v. 29, n. 2, p. 241–248, 2009.

HANCOCK, J. N.; SWETNAM, L.D.; BENSON, F. J. Calculating farm machinery field capacities. **Agricultural Engineering Extension Publications**. p. 1-5, 1991.

HARRELL, F.E. **Regression modelling strategies with applications to linear models, logistic regression, and survival analysis**. Nova York: Springer-Verlag, 2001.

HARRIGAN, T.M.; ROTZ, C.A. Draft relationships for tillage and seeding equipment. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 11, n. 6, p. 773–783, 1995.

HEDGES, L.V.; VEVEA, J.L. Fixed- and random-effects models in meta-analysis. **Psychological Methods**, v. 3, n. 4, p. 486–504, 1998.

HILLIER, F.S.; LIEBERMAN, G.J. **Introdução à pesquisa operacional**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

HURVICH, C.M.; TSAI, C. Regression and time series model selection in small Samples. **Biometrika**, v. 76, n. 2, p. 297–307, 1989.

IMHOFF, C.S. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos**. Piracicaba, 2002. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2002.

KACHMAN, S.D.; SMITH, J.A. Alternative measures of accuracy in plant spacing for planters using single seed metering. **Transactions of the ASAE**, v. 38, n. 2, p. 379–387, 1995.

KARAYEL, D.; ÖZMERZI, A. Evaluation of three depth-control components on seed placement accuracy and emergence for a precision planter. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 24, n. 3, p. 271–276, 2008.

KOBAYASHI, K.; SALAM, M.U. Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 2, p. 345, 2000.

LAIRD, N.M.; WARE, J.H. Random-effects models for longitudinal data. **Biometrics**, v. 38, n. 4, p. 963–974, 1982.

LAN, Y.; KOCHER, M.F.; SMITH, J.A. Opto-electronic sensor system for laboratory measurement of planter seed spacing with small seeds. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 72, n. 2, p. 119–127, 1999.

LANDERS, J.N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1995.

LARSON, R.; FARBER, B. **Estatística aplicada**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010. 638p.

LINDSTROM, M.J.; BATES, D.M. Newton-Raphson and EM algorithms for linear mixed-effects models for repeated-measures data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 83, n. 404, p. 1014–1022, 1988.

LIU, W.; TOLLENAAR, M.; STEWART, G.; DEEN, W. Response of corn grain yield to spatial and temporal variability in emergence. **Crop Science**, v. 44, p. 847–854, 2004.

LONGFORD, N.T. **Random coefficient models**. Nova York: Oxford University Press, 1993.

LOPES, A.; FURLANI, C.E.A. Desenvolvimento de um protótipo para medição do consumo de combustível em tratores. **Revista Brasileira de Agroinformática**, v. 5, n.1, p. 24-31, 2003.

LOPES, A.; LANÇAS, K.P.; FURLANI, C.E.A.; NAGAOKA, A.K.; CASTRO NETO, P.; GROTTA, D.C.C. Consumo de combustível de um trator em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de trabalho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 2, p. 382–386, 2003.

LUTH, H.J.; WISMER, R.D.P. Performance of plane soil cutting blades in clay. **Transactions of the ASAE**, v. 15, n. 2, p. 211–216, 1972.

MACINTIRE, D.; GRAY, A.G.; SHARP, M.J. The development and fields trials of the “A” blade coulter for introducing seed into the soil. **Journal Agricultural Engineering Research**, v. 41, p. 43–51, 1986.

MAHL, D. **Desempenho operacional de semeadora em função de mecanismos de corte, velocidade e solos, no sistema de plantio direto do milho**. Botucatu: UNESP, 2006. 143f. Tese (Doutorado em Agronomia). Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2006.

MAHL, D.; GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, A.R.B. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 150–157, 2004.

MAHL, D.; GAMERO, A.C.; BENEZ, S.H. Demanda energética de semeadora-adubadora de plantio direto em função de elementos de corte, velocidade e tipo de solo. **Energia na Agricultura**, v. 22, n. 3, p. 15–36, 2007.

MELLO, L. M. M.; TAKAHASHI, C. M.; YANO, E. H. Condicionamento físico do solo na linha de semeadura de milho em plantio direto: mecanismos sulcadores e rodas compactadoras. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. 1 CD-ROM.

MELLO, A.J.R.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; LOPES, A.; BORSATTO, E.A. Produtividade de híbridos de milho em função da velocidade de semeadura. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 479–486, ago. 2007.

MANTOVANI, E.C. **Compactação do solo**. Informação Agropecuária, Belo Horizonte, v. 13, 1987. 147p.

MIALHE, L.G. **Manual de mecanização agrícola**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1974. 301 p.

MIALHE, L.G. **Gerência de sistema tratorizado vs operação otimizada de tratores**. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 1991.

MIALHE, L.G. **Máquinas agrícolas para plantio**. Campinas: Millennium Editora, 2012.

MITCHELL, P.L.; SHEEHY, J.E. Comparison of predictions and observations to assess model performance: a method of empirical validation. In: KROPFF, M.J.; TENG, P.S.; AGGARWAL, P.K.; BOUMA, J.; BOUMAN, B.A.M.; JONES, J.W.; VAN LAAR, H.H. (Org.). **Applications of systems approaches at the field level**. Boston: Kluwer Academic, 1997. p. 437–451.

MODOLO, A.J. **Demanda energética de uma semeadora-adubadora com diferentes unidades de semeadura**. Cascavel: UNIOESTE, 2003. 78f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2003.

MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; SILVEIRA, J.C.M.; MERCANTE, E. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, n. 4, p. 298–306, 2004.

MONTGOMERY, D.B.; MORRISON, D.G. A note on adjusting R2. **The Journal of Finance**, v. 28, n. 4, p. 1009, set. 1973.

NAGAOKA, A.K.; NOMURA, R.H.C. Tratores: semeadura. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n. 18, p. 24-26, 2003.

OHTANI, K. Bootstrapping R2 and adjusted R2 in regression analysis. **Economic Modelling**, v. 17, n. 4, p. 473–483, 2000.

ORELIEN, J.G.; EDWARDS, L.J. Fixed-effect variable selection in linear mixed models using R2 statistics. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 52, n. 4, p. 1896–1907, 2008.

PACHECO, E.P. **Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas**. Rio Branco: Embrapa Acre, 2000. 21p. (Embrapa Acre. Documentos, 58)

PALMA, M.A.Z.; VOLPATO, C.E.S.; BARBOSA, J.A.; SPAGNOLO, R.T.; BARROS, M.M. Efeito da profundidade de trabalho das hastes sulcadoras de uma semeadora-adubadora na patinação, na força de tração e no consumo de combustível de um trator agrícola. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 5, p. 1320–1326, 2010.

PICARD, R.R.; COOK, R.D. Cross-validation of regression models. **American Statistical Association**, v. 79, p. 575–583, 1984.

PORTELLA, J.A.; FAGANELLO, A.; SATTLER, A. Máquinas e implementos para plantio direto. In: EMBRAPA (Org.). **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p. 29–36.

PORTELLA, J.A. **Semeadoras para plantio direto**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001.

POTIER, M. Pneus: la pression baisse. **Agri-Decideur**, n.26, p.15- 28, 1990.

QUEIROZ, R.F.; MOTA, W.A.; MACEDO, D.X.S.; COSTA, E.; CHIORDEROLI, C.A. Cargas no depósito de fertilizante de uma semeadora-adubadora e desempenho operacional. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 2, p. 271–277, 2016.

REIS, E.F.; MOURA, J.R.; DELMOND, J.G.; CUNHA, J.P.A.R. Características operacionais de uma semeadora-adubadora de plantio direto na cultura da soja (*Glycine Max (L.) Merrill*). **Agricultura Conservacionista**, v. 16, n. 3, p. 70–75, 2007.

ROSCOE, D. D.; JENKINS, S. A meta-analysis of campaign contributions' impact on roll call voting. **Social Science Quarterly**, 2005.

SACKS, H.S.; REITMAN, D.; PAGANO, D.; KUPELNICK, B. Meta-analysis: an update. **The Mount Sinai Journal of Medicine**, New York, v. 63, n. 3–4, p. 216–24, 1996.

SANTOS, P.M. **Modelagem do desempenho em tração de conjuntos mecanizados visando ao dimensionamento do trator**. Santa Maria: UFSM, 2010. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **The Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.

SEARLE, S.R.; CASELLA, G.; MCCULLOCH, C.E. **Variance components**. Nova York: Wiley, 1992.

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

SILVEIRA, J.C.M.; MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; GABRIEL FILHO, A. Força de tração e potência em duas velocidades de deslocamento e duas profundidades de deposição de sementes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 125-128, 2005.

SILVEIRA, J.C.M.; FERNANDES, H.C.; MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; TROGELLO, E. Demanda energética de uma semeadora-adubadora em diferentes velocidades de deslocamento e rotações do motor. **Revista Ciência Agronômica**, 1, v. 44, n. 1, p. 44–52, 2013.

SIQUEIRA, R.; ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R. & RALISCH, R. Desempenho energético de semeadoras-adubadoras de plantio direto na implantação da cultura da soja (*Glycine max* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30., Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** Foz do Iguaçu, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. CD-ROM.

SIQUEIRA, R.; CASÃO JÚNIOR, R.; ARAÚJO, A.G. **Ângulo ideal**. Londrina, PR: IAPAR, 2002.

SIQUEIRA, R.; CASÃO JÚNIOR, R. **Trabalhador no cultivo de grãos e oleaginosas**: máquinas para manejo de coberturas e semeadura no sistema de plantio direto. Curitiba: SENAR-PR, 2004.

SIQUEIRA, R. **Milho**: semeadoras-adubadoras para sistema de plantio direto com qualidade. Londrina, PR: IAPAR, 2008.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by Akaike's information criterion and the finite corrections. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, v. 7, n. 1, p. 13–26, 1978.

SUN, Y.; ZHANG, W.; TONG, H. Estimation of the covariance matrix of random effects in longitudinal studies. **The Annals of Statistics**, v. 35, n. 6, p. 2795–2814, 2007.

TEDESCHI, L.O. Assessment of the adequacy of mathematical models. **Agricultural Systems**, v. 89, n. 2, p. 225–247, 2006.

TERMINIELLO, A.M.; BALBUENA, R.H.; CLAVERIE, J.A.; MACDONAGH, P.M. Efecto de la adición de cuchillas circulares sobre escarificadores de cinceles. **Agro-Ciencia**, v. 13, n. 3, p. 331–335, 1997.

TRUCANO, T.G.; SWILER, L.P.; IGUSA, T.; OBERKAMPF, W.L.; PILCH, M. Calibration, validation, and sensitivity analysis: what's what. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 91, n. 10–11, p. 1331–1357, 2006.

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2005.

VERBEKE, G.; MOLENBERGHS, G. **Linear mixed models for longitudinal data**. Nova York: Springer-Verlag, 2000.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J.W.; BRUN, F. Model Evaluation. In: _____ (Org.). **Working with dynamic crop models: methods, tools and examples for agriculture and environment**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2014. p. 345–406.

WALLACH, D.; GOFFINET, B. Mean squared error of prediction as a criterion for evaluating and comparing system models. **Ecological Modelling**, v. 44, p. 299–306, 1989.

WITNEY, B. **Choosing and using farm machines**. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1998. 411p.

WOLDENBERG, M.J. **Models in geomorphology**. Londres: George Allen & Unwin, 1985.

YANAI, K.; SILVEIRA, G.M.; LANÇAS, K.P.; CORRÊA, I.M.; MAZIERO, J.V.G. Desempenho operacional de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 8, p. 1427–1434, ago. 1999.

ANEXO A – PUBLICAÇÕES SELECIONADAS

1. ALMEIDA, R.A.S.; TAVARES-SILVA, C.A.; SILVA, S.L. Desempenho energético de um conjunto trator-semeadora em função do escalonamento de marchas e rotações do motor. **Revista Agrarian**, v. 3, n. 7, p. 63–70, 2010.
2. ANDREOLLA, V.R.M. **Eficácia de sulcadores de semeadoras-adubadoras e suas implicações sobre a cultura da soja e nos atributos físicos de um Latossolo sob integração lavoura-pecuária**. Cascavel: UNIOESTE, 2005. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.
3. ARAÚJO, A.G.; CASÃO JÚNIOR, R.; RALISCH, R.; SILVA, A.L.; LADEIRA, A.D.; ROSSETTO, R.; SILVA, J.C.; MACHADO, P. **Desempenho da semeadora-adubadora direta PST² - Marchesan em solos argilosos**. Londrina: IAPAR, 2000, 44p. (Circular 107).
4. BONINI, A.K. **Compactação de um latossolo vermelho distroférico sob sistema de plantio direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho**. Cascavel: UNIOESTE, 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.
5. BORTOLOTTO, V.C.; PINHEIRO NETO, R.; BORTOLOTTO, M.C. Demanda energética de uma semeadora-adubadora para soja sob diferentes velocidades de deslocamento e cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 122–130, 2006.
6. CAMILO, A. J.; FERNANDES, H.C.; MODOLO, A.J.; RESENDE, R.C. Influência de mecanismos rompedores e velocidades de trabalho no desempenho de uma semeadora-adubadora de plantio direto do feijão. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, n. 03, p. 203-211, 2004.
7. CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A.G.; RALISCH, R. Desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 em plantio direto no basalto paranaense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 3, p. 523–532, 2000.
8. CASÃO JÚNIOR, R.; ARAÚJO, A.G.; RALISCH, R.; SILVA, A.L.; LADEIRA, A.D.; SILVA, J.C.; MACHADO, P.; ROSSETTO, R. **Avaliação do desempenho da semeadora-adubadora Magnum 2850 PD no basalto paranaense**. Londrina: IAPAR, 2000, 46p. (Circular 105).
9. MEDEIROS, G.B.; MONICE, R.; SIQUEIRA, R.; **Desempenho da semeadora-adubadora SA 13 500 - Vence Tudo em solos argilosos**. Londrina: IAPAR, 2000, 46p. (Circular 110).
10. CASÃO JÚNIOR, R.; ARAÚJO, A.G.; RALISCH, R.; MEDEIROS, G.B.; MONICE, R.; SIQUEIRA, R.; SILVA, A.L.; LADEIRA, A.D.; SILVA, J.C.; MACHADO, P.;

- ROSSETTO, R. **Desempenho da semeadora-adubadora SA 13 500 - Vence Tudo em solos argilosos**. Londrina: IAPAR, 2000, 46p. (Circular 110).
11. CASÃO JÚNIOR, R.; RALISCH, R.; ARAÚJO, A.G.; MEDEIROS, G.B.; MONICE, R.; SIQUEIRA, R.; SILVA, A.L.; LADEIRA, A.D.; SILVA, J.C.; MACHADO, P.; ROSSETTO, R. **Desempenho das semeadoras-adubadoras MPS 1600 e MPS 1000 IMASA em solos argilosos**. Londrina: IAPAR, 2000, 44p. (Circular 111).
 12. CEPIK, C.T.C. **Análise do desempenho de uma haste sulcadora de semeadora-adubadora, em diferentes teores de água no solo, velocidades e profundidades de trabalho**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
 13. CEPIK, C.T.C. **Parâmetros de solo e máquinas em semeadura direta com doses de cobertura e configurações de deposição de fertilizante**. Porto Alegre: UFRGS, 2006. 118 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
 14. CHIODEROLI, C.A. **ConSORCIAÇÃO de *Urochloas* com milho em sistema de plantio direto como cultura antecessora da soja de verão**. Jaboticabal: UNESP, 2013. 200 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.
 15. CONTE, O.; LEVIEN, R.; TREIN, C.R.; XAVIER, A.A.P.; DEBIASI, H. Demanda de tração, mobilização de solo na linha de semeadura e rendimento da soja, em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 10, p. 1254–1261, 2009.
 16. CORTEZ, J.W.; FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; CARVALHO FILHO, A. Parâmetros de avaliação no solo, na máquina e na planta sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, v.98, p.24–34, 2007.
 17. FRANCETTO, T.R. **Desempenho de mecanismos de corte dos resíduos culturais e abertura de sulco para a semeadura direta**. Santa Maria: UFSM, 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
 18. FURLANI, C.E.A.; LOPES, A.; SILVA, R.P. Avaliação de semeadora-adubadora de precisão trabalhando em três sistemas de preparo do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 458–464, 2005.
 19. FURLANI, C.E.A.; LOPES, A.; SILVA, R.P.; REIS, G.N. Exigências de uma semeadora-adubadora de precisão variando a velocidade e a condição da superfície do solo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 920–923, 2005.
 20. FURLANI, C.E.A.; PAVAN JÚNIOR, A.; LOPES, A.; SILVA, R.P.; GROTTA, D.C.C.; CORTEZ, J.W. Desempenho operacional de semeadora-adubadora em

- diferentes manejos da cobertura e da velocidade. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 2, p. 456–462, 2007.
21. FURLANI, C.E.A.; SILVA, R.P.; CARVALHO FILHO, A.; CORTEZ, J.W.; GROTTA, D.C.C. Semeadora-adubadora: exigências em função do preparo do solo, da pressão de inflação do pneu e da velocidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 345–352, 2008.
 22. FURLANI, C.E.A.; CANOVA, R.; CAVICHIOLI, F.A.; BERONHA, R.S.; SILVA, R.P. Demanda energética por semeadora-adubadora em função da haste sulcadora na semeadura do milho. **Revista Ceres**, v. 60, n. 6, p. 885–889, 2013.
 23. GROTTA, D.C.C. **Desempenho operacional de semeadora-adubadora e perdas na colheita do milho em sistema plantio direto**. Jaboticabal: UNESP, 2008. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2008.
 24. KAMIMURA, K.M. **Parâmetros de solo, máquina e planta em função de doses de resíduos vegetais e profundidades de deposição de fertilizantes em semeadura direta**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
 25. LEVIEN, R.; FURLANI C.E.A.; GAMERO, C.A.; CONTE, O.; CAVICHIOLI, F.A. Semeadura direta de milho com dois tipos de sulcadores de adubo, em nível e no sentido do declive do terreno. **Ciência Rural**, v. 41, n. 6, p. 996–1002, 2011.
 26. MACEDO, D.X.S.; NICOLAU, F.E.A.; NASCIMENTO, H.C.F.; COSTA, E.; CHIODEROLI, C.A.; LOUREIRO, D.R. Operational performance of a tractor-seeder according to the velocity and working depth. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 280–285, 2016.
 27. MAHL, D.; GAMERO, C.A.; BENEZ, S.H. FURLANI, C.E.A.; SILVA, A.R.B. Demanda energética e eficiência da distribuição de sementes de milho sob variação de velocidade e condição de solo. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 1, p. 150–157, 2004.
 28. MERCANTE, E.; SILVA, S.L.; MODOLO, A.J.; SILVEIRA, J.C.M. Demanda energética e distribuição de sementes de milho em função da velocidade de duas semeadoras. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 424–428, 2005.
 29. MILAGRES, R.S.; FURTADO JÚNIOR, M.R.; SILVA, A.C.; FONTES, J.M. Desempenho de um conjunto trator-semeadora-adubadora em função do mecanismo sulcador e velocidade de deslocamento. **Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 2, p. 143–153, 2015.
 30. MION, R.L.; BENEZ, S.H. Esforços em ferramentas rompedoras de solo de semeadoras de plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1594–1600, 2008.

31. MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; SILVEIRA, J.C.M.; MERCANTE, E. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de precisão em diferentes velocidades. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, n. 4, p. 298–306, 2004.
32. MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; GABRIEL FILHO, A.; SILVEIRA, J.C.M.; GNOATTO, E. Demanda energética solicitada por uma semeadora-adubadora de precisão com diferentes unidades de semeadura. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 3, p. 473–479, 2005.
33. OLIVEIRA, M.L.; VIEIRA, L.B.; MANTOVANI, E.C.; SOUZA, C.M.; DIAS, G.P. Desempenho de uma semeadora-adubadora para plantio direto, em dois solos com diferentes tipos de cobertura vegetal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 7, p. 1455–1463, 2000.
34. PALMA, M.A.Z. **Efeito da profundidade de hastes sulcadoras na patinagem, força de tração e consumo de combustível de um trator agrícola**. Lavras: UFLA, 2010. Dissertação (Mestrado em Máquinas e Automação Agrícola) Programa de Pós-Graduação em Máquinas e Automação Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.
35. QUEIROZ, R.F.; MOTA, W.A.; MACEDO, D.X.S.; COSTA, E.; CHIORDEROLI, C.A. Cargas no depósito de fertilizante de uma semeadora-adubadora e desempenho operacional. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 48, n. 2, p. 271–277, 2016.
36. SANTOS, A.P. **Análise técnica de semeadoras-adubadoras para plantio direto de milho**. Lavras: UFLA, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
37. SEKI, A.S. **Demanda energética e produtividade da soja e do milho em áreas de plantio direto e cultivo mínimo**. Botucatu: UNESP, 2010. 150 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2010.
38. SILVEIRA, J.C.M.; MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; GABRIEL FILHO, A. Força de tração e potência de uma semeadora em duas velocidades de deslocamento e duas profundidades de deposição de sementes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 125–128, 2005.
39. SILVEIRA, J.C.M.; FERNANDES, H.C.; MODOLO, A.J.; SILVA, S.L.; TROGELLO, E. Demanda energética de uma semeadora-adubadora em diferentes velocidades de deslocamento e rotações do motor. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 1, p. 44–52, 2013.
40. TRICAI, E. **Avaliação de hastes sulcadoras na mobilização do solo em semeadura direta do milho**. Jaboticabal: UNESP, 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

41. TRINTIN, C.G. **Influência da velocidade no desempenho operacional de uma semeadora-adubadora na cultura da soja, no sistema de plantio direto.** Maringá: UEM, 2004. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2004.
42. TROGER, H.C.H.; REIS, A.V.; MACHADO, A.LT.; MACHADO, R.LT. Analyzing the efforts in furrow openers used in low power planters. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 6, p. 1133-1143, 2012.
43. ZERBATO, C. **Desempenho de máquinas para a semeadura e o arranquio mecanizado na cultura do amendoim em Latossolo vermelho.** Jaboticabal: UNESP, 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

ANEXO B – EQUAÇÕES DE FORÇA ESPECÍFICA

$$\mathbf{F8150} \quad Flin = -1,494 + 1,666 \cdot Den - 0,192 \cdot Rcul + 0,641 \cdot Padu + 0,081 \cdot Vel \\ + 0,020 \cdot Rcul \cdot Padu - 0,386 \cdot Den \cdot Padu$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

$$\mathbf{F1537} \quad Flin = -6,188 - 1,820 \cdot Are + 4,659 \cdot Den + 0,006 \cdot Rcul + 0,965 \cdot Padu \\ + 0,121 \cdot Vel - 0,100 \cdot Vel \cdot Are - 0,553 \cdot Den \cdot Padu$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Are = teor de areia;

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

$$\mathbf{F5382} \quad Flin = 2,535 + 3,398 \cdot Sil - 1,182 \cdot Den - 0,303 \cdot Rcul + 0,171 \cdot Padu \\ + 0,063 \cdot Vel + 0,031 \cdot Rcul \cdot Padu - 0,691 \cdot Padu \cdot Sil$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Sil = teor de silte;

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

$$\mathbf{F1544} \quad \mathit{Flin} = -5,876 + 0,524 \cdot \mathit{Sil} + 3,991 \cdot \mathit{Den} + 0,007 \cdot \mathit{Rcul} + 0,978 \cdot \mathit{Padu} \\ + 0,187 \cdot \mathit{Vel} - 0,430 \cdot \mathit{Vel} \cdot \mathit{Sil} - 0,560 \cdot \mathit{Den} \cdot \mathit{Padu}$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Sil = teor de silte;

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).

$$\mathbf{F7252} \quad \mathit{Flin} = -5,663 - 1,676 \cdot \mathit{Are} + 4,238 \cdot \mathit{Den} + 0,072 \cdot \mathit{Rcul} + 0,931 \cdot \mathit{Padu} \\ + 0,082 \cdot \mathit{Vel} - 0,153 \cdot \mathit{Rcul} \cdot \mathit{Are} - 0,531 \cdot \mathit{Den} \cdot \mathit{Padu}$$

em que:

Flin = força específica (kN.linha⁻¹);

Are = teor de areia;

Den = densidade do solo (Mg.m⁻³);

Rcul = massa de resíduos culturais de superfície por área (t.ha⁻¹);

Padu = profundidade de atuação do mecanismo sulcador (cm);

Vel = velocidade do conjunto mecanizado (km.h⁻¹).